Mark Buchanan

UBIQUITÀ

Dai terremoti al crollo dei mercati,
dai trend della moda
alle crisi militari:
la nuova legge universale
del cambiamento

MONDADORI

Traduzione di Laura Serra

http://www.mondadori.com/libri

ISBN 88-04-48960-X

© 2000 Mark Buchanan
© 2001 Arnoldo Mondadori Editore S.p.A., Milano
Titolo dell'opera originale
Ubiquity
The science of history...
or
Why the world is simpler than we think
I edizione settembre 2001

Indice

3 I Causa prima
24 II Misteri sismici
37 III Fallacia del senso comune
48 IV Accidenti della storia
63 V L'ubiquità dello stato critico
79 VI De magnete
93 VII La criticità autorganizzata
112 VIII Tempo di estinzioni
126 IX La rete della vita
148 X Montagne russe
169 XI Volenti o nolenti
180 XII Terremoti culturali
196 XIII Tradizione e rivoluzione
216 XIV L'importanza della storia
228 XV Poscritto metascientifico

235 *Note*
249 *Indice dei nomi*

Ubiquità

A Kate, a Nietzsche
e al Coniglio

I
Causa prima

La politica non è l'arte del possibile. Consiste nello scegliere tra il male e il peggio.

John Kenneth Galbraith[1]

La storia è la scienza delle cose che non si ripetono mai.

Paul Valéry[2]

Il 28 giugno 1914 era una bella giornata estiva a Sarajevo. Verso le undici di mattina un'auto con due passeggeri a bordo imboccò a una curva una direzione sbagliata e si ritrovò in un vicolo cieco. Pareva un errore banale, di quelli che capitano spesso su strade polverose e trafficate, ma così non fu: quello sbaglio commesso quel particolare giorno da quel particolare autista sconvolse la vita di centinaia di milioni di persone, alterando l'intero corso della storia.

La macchina si fermò davanti a Gavrilo Princip, uno studente serbo-bosniaco di diciannove anni che apparteneva all'organizzazione terroristica serba Mano Nera. Incredulo per l'inatteso colpo di fortuna, il giovane estrasse la pistola, la puntò e premette il grilletto due volte, uccidendo i passeggeri dell'auto: l'arciduca Francesco Ferdinando, erede al trono austriaco, e sua moglie Sofia. Dopo poche ore l'equilibrio politico europeo cominciò a incrinarsi irreparabilmente.

Nei giorni seguenti l'Austria approfittò dell'assassinio dell'arciduca per pianificare l'invasione della Serbia. La Russia offrì il suo appoggio ai serbi, mentre la Germania si schierò con l'Austria contro la Russia. Tempo un mese, una reazione a catena di minacce e promesse indusse gli eserciti d'Europa a mobilitarsi e strinse Austria, Russia, Germania, Francia, Gran

Bretagna e Turchia in un nodo mortale. Quando, cinque anni dopo, il conflitto finì, erano morte dieci milioni di persone. Il vecchio continente visse vent'anni di pace inquieta prima che la seconda guerra mondiale mietesse altre trenta milioni di vite. Perché in soli tre decenni il mondo fu colpito da due catastrofi di portata globale? Possibile che fosse tutta colpa dell'autista di Sarajevo?

Sulle cause della prima guerra mondiale si è ovviamente dibattuto a lungo. Secondo lo storico A.J.P. Taylor, l'attentato all'arciduca fu solo l'episodio scatenante: il conflitto in realtà sarebbe stato provocato da una serie di circostanze che costrinsero i paesi europei a preparativi militari e a dichiarazioni di guerra dai quali non poterono più recedere. Gli stati belligeranti «divennero prigionieri delle loro stesse armi».[3] Secondo altri storici la grande guerra sarebbe scoppiata per l'espansionismo nazionalista della Germania, la quale si sarebbe spinta fino all'aggressione perché da quando, mezzo secolo prima, era stata unificata da Bismarck, non aveva smesso di nutrire mire territoriali. Le ipotesi sulle origini del conflitto sono tante, più o meno una per ogni storico che si è occupato del problema, e ancora oggi continuano ad apparire importanti studi sull'argomento.[4] Ma vale la pena ricordare – e sottolineare – che tutte queste interpretazioni sono state elaborate molto tempo dopo il fatto.

Vale anche la pena ricordare, nel momento in cui ci interroghiamo sulla nostra capacità di capire il ritmo naturale della storia umana e di intuire sia pur vagamente gli eventi futuri, che l'Europa dell'Ottocento aveva vissuto un lungo periodo di tranquillità e che agli storici di inizio Novecento la prima guerra mondiale fece l'effetto di una terribile tempesta scoppiata senza apparente motivo in un cielo sereno. «Tutti i diavoli dell'inferno imperversarono per il mondo seminando impunemente distruzione» scrisse lo storico americano Clarence Alvord a conflitto finito. «Il bel palazzo della storia, che era stato progettato e costruito dai miei contemporanei, fu ridotto in polvere ... Il significato che noi storici avevamo creduto di leggere in quel palazzo si rivelò purtroppo falso.»[5] Alvord e altri studiosi avevano teorizzato che nel passato si intravedes-

se il disegno del futuro e si erano convinti che la storia umana seguisse un'evoluzione razionale graduale. Dopo il 1914, invece, dovettero ammettere che il futuro è in balia di forze irrazionali e malefiche che preparano nell'ombra catastrofi spaventose.

La prima guerra mondiale è diventata l'archetipo dello sconvolgimento imprevisto, «il più tragico errore di direzione della storia»,[6] e si potrebbe ottimisticamente ritenere improbabile che un evento così eccezionale si ripeta. Oggi, con il senno del poi, gli storici reputano di avere individuato le principali cause dei due conflitti mondiali e pensano ancora una volta di poter prevedere a grandi linee il futuro. Ma Alvord e altri nutrivano un'analoga fiducia un secolo fa. Inoltre gli odierni esseri umani, storici compresi, non prevedono gli avvenimenti più di quanto li prevedessero i loro predecessori.

A metà anni Ottanta l'Unione delle Repubbliche Socialiste Sovietiche esisteva ormai da tre quarti di secolo e pareva un'istituzione immutabile nello scenario mondiale. Gli Stati Uniti temevano che avesse un apparato militare molto sofisticato e pensavano di potersi mantenere competitivi solo con uno sforzo concertato. Nel 1987 neanche compulsando intere biblioteche di storia e scienze politiche si sarebbe trovato un autore che osasse pronosticare il crollo dell'Urss nel breve arco di mezzo secolo o, meno che mai, di un decennio. Eppure, con stupore di tutti, l'impensabile divenne realtà di lì a pochi anni.

Sulla scia degli avvenimenti sovietici, alcuni storici elaborarono nuove teorie. La democrazia, conclusero, era ormai diffusa dappertutto, quasi tutte le barriere erano cadute e il pianeta godeva di un pacifico, durevole «nuovo ordine mondiale», come presero a chiamarlo in Occidente i politici, lieti di poter proclamare finalmente la vittoria della democrazia (e del capitalismo) sul comunismo. Si ipotizzò addirittura che si stesse avvicinando la «fine della storia»:[7] il mondo aveva raggiunto l'equilibrio definitivo della democrazia globale, risultato ultimo di una lotta che era durata secoli e che aveva avuto come obiettivo di soddisfare la profonda aspirazione umana alla dignità personale. Pochi anni dopo, l'Europa vide divampare guerre e perpetrare atroci crimini nell'allora Iugo-

slavia. Una momentanea battuta d'arresto o il primo, sinistro presagio di sviluppi futuri?

Gli storici spiegano in maniera assai convincente il motivo e la dinamica degli avvenimenti, ma solo *post factum*. È logico che le spiegazioni siano a posteriori: dopotutto, «storia» significa analisi e interpretazione del passato. «La vita si comprende guardando al passato, ma si vive guardando al futuro» disse Søren Kierkegaard riassumendo la difficile condizione umana. Tuttavia il costante ripetersi delle interpretazioni elaborate con il senno del poi mostra che non esiste un modello chiaro e comprensibile delle vicende umane. Nella nostra storia, ogni nuovo dramma, ogni nuovo cataclisma giungono sempre inaspettati.

Perciò, sebbene cerchino di rinvenire le costanti significative negli avvenimenti del passato, molti storici sono probabilmente d'accordo con H.A.L. Fisher, che nel 1935 scrisse:

> Uomini più saggi e colti di me hanno creduto di riconoscere nella storia un disegno, una periodicità, uno schema predeterminati. Io queste costanti non le ho mai individuate. Vedo solo un susseguirsi di circostanze impreviste ... e un'unica regola sicura per lo storico: bisogna ammettere che nel dipanarsi dei destini umani il contingente e l'inaspettato hanno un ruolo fondamentale ... A volte il terreno guadagnato da una generazione viene perso da quella successiva.[8]

Date le premesse, forse i lettori si stupiranno di apprendere che il presente saggio ha per tema, non la storia, ma la fisica teorica. Può sembrare strano che in apertura qui si parli delle guerre mondiali del secolo scorso e della natura capricciosa e incoerente delle vicende umane. Non è certo una novità che la storia segua vie tortuose e che si sia sempre fatta beffe di chi tentava di prevederne il corso. Mi propongo però di convincere il lettore che viviamo in un'epoca speciale e che nuove, originalissime idee ci consentono oggi di capire perché la storia sia com'è; perché sia, o addirittura debba essere, costellata di avvenimenti inattesi e sconvolgenti e perché tutti i passati tentativi di comprenderne i cicli, gli sviluppi e le leggi si siano sempre risolti in un insuccesso.

Una calma precaria

Si può pensare che la storia sfidi la nostra comprensione perché è il frutto delle azioni imponderabili degli esseri umani. Se proviamo a moltiplicare per un miliardo l'imprevedibilità individuale, non ci parrà più così strana la mancanza di leggi semplici e chiare che, come quelle di Newton in fisica, permettano allo studioso di prevedere le evoluzioni future. È dunque questo il motivo dell'imperscrutabilità della storia? Si direbbe una conclusione plausibile, ma bisogna riflettere bene prima di trarla. Quello storico non è l'unico campo in cui si producono sconvolgimenti inattesi e in cui il corso delle vicende è sistematicamente alterato dal più insignificante degli avvenimenti. Nel nostro mondo tali caratteristiche sono onnipresenti e alcuni scienziati hanno cominciato a pensare che abbiano, all'origine, motivi profondi.

La città di Kobe è una delle perle del Giappone moderno. Sorge sulla costa meridionale di Honshu, la maggiore isola dell'arcipelago, e il suo porto, il sesto del mondo, gestisce ogni giorno quasi un terzo delle importazioni ed esportazioni nipponiche. Vanta scuole eccellenti e i suoi abitanti sono a buon diritto convinti di vivere in un'oasi di stabilità ambientale. In poche parole, ha buoni motivi per autodefinirsi «luogo di villeggiatura urbano»:[9] per secoli ad albe serene sono seguiti caldi, luminosi pomeriggi e fresche, placide sere. Chi, sette o otto anni fa, avesse visitato Kobe, non avrebbe mai sospettato che sotto i suoi piedi forze invisibili si stessero preparando a esplodere con formidabile violenza; ma lo avrebbe constatato con terrore se si fosse trovato sul luogo alle cinque e tre quarti del 17 gennaio 1995, quando la calma di colpo s'infranse.

In quel momento, in una località non molto lontana dalla costa coreana, venti chilometri a sudovest della città, si frantumarono d'un tratto dei blocchi rocciosi del fondo oceanico. Di per sé l'evento non fu significativo: ogni giorno si registrano piccoli assestamenti della crosta terrestre in risposta alle tensioni che si accumulano lentamente mentre le placche continentali si spostano, a stretto contatto, sulla superficie del pianeta. Ma a Kobe quello che era iniziato come un piccolo

assestamento innescò una reazione a catena. Frantumandosi, le prime rocce accrebbero la tensione esercitata su altre rocce vicine, che si frantumarono a loro volta. Altre rocce ancora seguirono l'esempio e in soli quindici secondi la terra si spaccò lungo una linea di cinquanta chilometri. Il conseguente terremoto squassò il terreno con la forza di cento bombe nucleari, distruggendo tutte le principali strade e ferrovie vicino a Kobe e facendo crollare o inclinare oltre centomila edifici. Presto scoppiarono furiosi incendi che furono domati solo dopo una settimana, e i centottantasei attracchi del porto rimasero quasi tutti inattivi. I morti furono cinquemila, i feriti trentamila e i senzatetto trecentomila.[10]

Per secoli l'area intorno alla città era stata geologicamente tranquilla. Come mai, in pochi secondi, esplose in quel modo?

È noto che l'arcipelago nipponico è a rischio sismico. Nel 1891 un terremoto dieci volte più violento di quello di Kobe rase al suolo la città di Nobi, nel Giappone centrale, e altre località furono colpite nel 1927, nel 1943 e nel 1948. Gli intervalli fra quei grandi terremoti – 35, 16 e 5 anni – non denotano una sequenza semplice e prevedibile, come non la denotano gli intervalli fra tutti gli altri terremoti. Se lo storico H.A.L. Fisher non riconosceva nella storia «un disegno, una periodicità, uno schema predeterminati», nemmeno i geologi sono riusciti, nonostante sforzi immani, a individuare una regolarità nell'attività sismica della terra.

Oggi la scienza registra con impressionante precisione il moto di asteroidi e comete lontani; invece nel funzionamento della terra c'è qualcosa che rende estremamente difficile, se non addirittura impossibile, la previsione dei sismi. Come la trama della politica internazionale, la crosta terrestre è soggetta a cataclismi sporadici e apparentemente inesplicabili.

L'incendio di Yellowstone

A ovest del vasto Bighorn Basin, nel Wyoming, il territorio libero e selvaggio del Parco nazionale di Yellowstone incrocia la dorsale delle Montagne Rocciose. Immense foreste di pioppi tremuli e pini contorti coprono i monti di una morbida col-

tre che cela orsi bruni, grizzly, alci, alci americani, cervi, daini e innumerevoli specie di uccelli e scoiattoli. La vita prospera in quella foresta primordiale. Qui e là spunta di tra i pini una grande cupola di roccia che torreggia come una sentinella eterna. Yellowstone è il più bel parco nazionale d'America: fu posto sotto la tutela federale nel 1972 e adesso accoglie oltre un milione di turisti l'anno.

Tuttavia quel luogo di pace suprema a volte è teatro di incendi devastanti. I fulmini ne provocano parecchie centinaia all'anno, che perlopiù distruggono da mezzo ettaro a pochi ettari; ma a volte, benché più raramente, di ettari ne bruciano centinaia o addirittura migliaia. Nel 1886 il più grande incendio della storia del parco ne aveva distrutti «solo» diecimila; così quando, alla fine di giugno del 1988, durante un temporale un fulmine provocò un piccolo incendio vicino al confine meridionale del parco, non ci si preoccupò troppo. All'incendio fu dato il nome di Shoshone e il servizio forestale cominciò a controllarne l'avanzata. Una settimana dopo i fulmini avevano provocato altri due incendi di modeste dimensioni in altre zone. Il 10 luglio, quando cadde una breve pioggia, qualche fiamma covava ancora qui e là sotto la cenere, ma la situazione appariva sotto controllo e prometteva di risolversi entro poche settimane. Invece, contrariamente alle previsioni, peggiorò.

Se siano stati il clima insolitamente secco o i venti persistenti nessuno lo sa, ma a metà luglio gli incendi aumentarono. «Fino ad allora tutto era sempre stato normale, su quel fronte»[11] ricordò in seguito un portavoce del National Park Service. Ma il 14 luglio un incendio battezzato Clover (trifoglio) distrusse quasi duemila ettari, e un altro chiamato Fan (ventaglio) ne bruciò mille. Quattro giorni dopo, un terzo incendio scoppiato nell'area di Mink Creek si propagò per oltre cinquemila ettari e i funzionari forestali cominciarono a vedere ciò che nessun esperto aveva previsto. D'un tratto lo Shoshone riprese vita, divorando dodicimila ettari di terreno in pochi giorni, e in agosto ottantamila ettari erano bruciati o stavano bruciando. Le fiamme avanzavano tra gli otto e i sedici chilometri al giorno su tutti i fronti e la soffocante coltre di fumo raggiungeva i sedici chilometri d'altezza.

Nei successivi due mesi, più di diecimila pompieri, provenienti da ogni parte del paese, usarono centodiciassette aerei e oltre cento autopompe nel vano tentativo di domare l'incendio, che alla fine distrusse seicentomila ettari, costò al governo federale oltre centoventi milioni di dollari e si spense solo in autunno, con l'arrivo della prima neve. Per qualche motivo, due o tre banali fulmini avevano scatenato un inferno indomabile al confronto del quale il precedente grande incendio del 1886 pareva un fuoco di barbecue in cortile. Che cosa rese le fiamme del 1988 così terribili e perché nessuno ne previde la portata?

Il lunedì nero

Il 23 settembre 1987 gli investitori di tutto il mondo lessero sul «Wall Street Journal» un titolo ancora più entusiasmante di quelli già usciti poco tempo prima: *Salgono alle stelle i titoli industriali: crescita record di 75,23 punti.*[12] Era stata un'estate incredibile: con singolare regolarità, per mesi le quotazioni erano aumentate quasi ogni giorno, procurando un facile profitto agli azionisti. Diverse settimane prima la Borsa di New York aveva segnato un record epocale; da allora si era avuta una leggera flessione, ma il rialzo del 23 settembre era proprio ciò che la maggior parte degli operatori si aspettava: le piccole «correzioni» al ribasso, come pareva naturale, erano finite e si prospettavano ulteriori guadagni. «In un mercato come questo, ogni nuova è buona nuova» disse un agente di cambio. «Ormai diamo per scontato di essere in fase di rialzo.»[13]

Quando il 6 ottobre, quindici giorni dopo, la Borsa aprì a Wall Street, gli analisti si aspettavano dunque un ulteriore aumento delle quotazioni e, vedendo gli indici scendere sensibilmente, all'inizio non si preoccuparono: doveva essere un'altra piccola correzione, pensarono, una temporanea battuta d'arresto causata dall'incertezza degli investitori in merito ai tassi d'interesse o al valore del dollaro. Ma per qualche motivo la piccola correzione diventò sempre più grande. Alla fine della giornata un'improvvisa epidemia di vendite inferse un duro

colpo agli ottimisti che speravano ancora che il mercato si riprendesse. Come osservò qualcuno sul «Wall Street Journal»:

> La batosta arrivò all'improvviso. Non credevo sarebbe stata così brutta ... Verso le tre del pomeriggio guardammo raggelati i monitor. I telefoni smisero di squillare. E ci trovammo di fronte alla storia.[14]

Ma il dramma era appena all'inizio.

Con toni rassicuranti, la stampa si affrettò a precisare che, se si considerava la situazione in termini di punti percentuali, il crollo del 6 ottobre non era uno dei cento peggiori; insomma non era così grave. I titoli continuarono a scendere la settimana successiva, e il 14, 15 e 16 ottobre vi furono tre considerevoli ribassi uno di seguito all'altro. Il «Wall Street Journal», però, non perse la fiducia e la speranza:

> È stato il terzo grosso scivolone in tre giorni. Ma secondo numerosi analisti finanziari, il grosso volume di scambi della sessione di venerdì starebbe a indicare un futuro più roseo all'orizzonte.[15]

In realtà significò qualcosa di assai più sinistro.

Il 19 ottobre, l'ormai famoso «lunedì nero», le segrete apprensioni accumulatesi per settimane nel cuore e nella mente di migliaia di grandi investitori trovarono improvviso sbocco in un'esplosione di paura. Quando la Borsa aprì alle nove e mezzo del mattino, fu subito panico e le quotazioni precipitarono. La frenesia di vendere era talmente incontrollata che nel tardo pomeriggio l'enorme valore globale di azioni e obbligazioni era sceso di oltre un quinto e 500 miliardi di dollari erano scomparsi dagli estratti conto degli investitori. Alla chiusura, quando gli operatori si resero conto di aver assistito al giorno più catastrofico della storia del mercato azionario, una cupa disperazione calò su Wall Street. «Poiché per due generazioni era stato detto e ripetuto che nulla di simile sarebbe mai potuto accadere, a tutti parve la fine del mondo» scrisse «Newsweek». Per gravità, il crollo fu quasi doppio di quello drammatico del 1929, anche se per fortuna non provocò una recessione economica globale. «Dio ci batté una mano sulla spalla per avvertirci che la festa era finita e che ci conveniva dire una preghiera» commentò un investitore miliardario.

Come nel caso della prima guerra mondiale o del terribile

terremoto di Kobe, nessuno aveva previsto il disastro. Subito *dopo*, però, gli analisti diedero del fenomeno varie spiegazioni, una meno convincente dell'altra. Ancora oggi le voci restano discordanti. Ecco le conclusioni di un esperto analista di Wall Street:

> Poiché il crac del 1987 ebbe un enorme impatto emotivo sulla gente, i teorici del «mercato come macchina» si affrettarono a elaborare interpretazioni razionali e a calcolare in che modo si potesse «riparare» il sistema. Secondo la teoria più accreditata, il crollo sarebbe stato causato dai cosiddetti programmi computerizzati di assicurazione portafoglio, che in pratica vendevano le azioni a mano a mano che il mercato calava ... Purtroppo, però, questa teoria non spiega affatto perché le Borse crollarono simultaneamente in tutto il mondo o perché il crollo a un certo punto si arrestò, né è in grado di dirci come mai, in tutto il pianeta, molti indici che non contemplano gli scambi computerizzati scesero ancora di più del Dow Jones americano dei titoli industriali. Infine, non tiene conto del fatto che per tutto il 1986 e il 1987 gli analisti non avevano mai smesso di sostenere con la più grande convinzione che un crollo del mercato azionario era impossibile per via di «misure di protezione intrinseche», come l'assicurazione portafoglio.[16]

Sul filo del rasoio

La guerra ha cause storico-politiche, il terremoto geofisiche, l'incendio boschivo ecologico-meteorologiche, il crac della Borsa economico-finanziarie e anche psicologiche. A prescindere dalla natura catastrofica, tutti questi fenomeni, pur traendo origine dal loro peculiare habitat, presentano un'affascinante somiglianza. In ciascuno degli episodi appena descritti l'organizzazione del sistema – l'intreccio di relazioni internazionali nel caso della guerra, la struttura della foresta o della crosta terrestre nel caso dell'incendio e del terremoto, la rete di aspettative e prospettive interconnesse degli investitori nel caso della Borsa – permise a una piccola scossa di scatenare una reazione assolutamente sproporzionata. Era come se quei sistemi fossero stati sempre sul filo del rasoio, in un equilibrio instabile pronto a esplodere da un momento all'altro.

Nella storia della vita troviamo uno schema analogo. I re-

perti fossili dimostrano che, nel complesso, il numero di specie del nostro pianeta è aumentato costantemente nel corso degli ultimi seicento anni. Eppure in almeno cinque distinte occasioni si verificarono improvvise, terribili estinzioni di massa che per poco non spazzarono via ogni creatura vivente. Che cos'accadde? Secondo molti paleontologi, tutto cominciò con la caduta di una cometa o di un grande asteroide che provocò repentine modifiche del clima terrestre con effetti devastanti sulla vita; secondo altri, l'estinzione di una specie innesca la scomparsa di altre specie in una reazione a catena capace di distruggere buona parte di un intero ecosistema. Benché biologi e geologi non abbiano ancora risolto l'enigma delle estinzioni di massa, una cosa è chiara: sebbene il tessuto della vita appaia elastico e dotato perlopiù di un equilibrio interno, la verità è leggermente più inquietante, perché a volte l'ecosistema globale accusa improvvisi collassi.

Quando ero alle elementari, l'insegnante di geometria ogni tanto mi assegnava uno dei compiti che più detestavo: stabilire se due triangoli fossero simili. Ci mostrava un triangolo grande e uno assai più piccolo orientato diversamente e ci chiedeva di individuarne la corrispondenza biunivoca, a prescindere dalle dimensioni e dall'orientamento. In altre parole ci domandava se, diminuendole o aumentandole di dimensioni e poi capovolgendole e ruotandole, saremmo riusciti a sovrapporre perfettamente le due figure. Se ci fossimo riusciti, le figure potevano definirsi simili, e noi avremmo sperimentato che le caratteristiche logiche fondamentali del triangolo sono date dagli angoli e dal rapporto tra le lunghezze dei lati.

Tre secoli fa Isaac Newton diede inizio a una rivoluzione scientifica osservando un altro genere di somiglianza. Senza dubbio i suoi contemporanei rimasero a bocca aperta quando disse che il moto di una mela che cade al suolo dall'albero è lo stesso della terra che si muove intorno al sole. Egli capì che la terra e la mela rientravano in una precisa categoria: quella degli oggetti che si muovono sotto l'influenza della gravità. Prima di lui nessuno aveva mai confrontato gli eventi della terra e del cielo; dopo di lui, il moto di una mela, di una freccia, di un satellite o addirittura di un'intera galassia furono conside-

rati profondamente simili, meri aspetti di un unico processo generale.

«L'arte di essere saggi è l'arte di capire che cosa scartare» scrisse il filosofo e psicologo americano William James,[17] e *Ubiquità* s'incentra sugli enormi progressi che sono stati compiuti in quest'arte in ambito scientifico: tratta infatti della profonda somiglianza che è stata rilevata non già fra i triangoli o fra gli oggetti in movimento, bensì fra vari tipi di sconvolgimenti (terremoti, crac in Borsa, grandi incendi ecc.) e fra le complesse reti in cui questi sconvolgimenti avvengono (sistemi economici, sistemi politici, ecosistemi ecc.). Potremmo aggiungere all'elenco gli spiccati mutamenti nella moda o nel gusto musicale, gli episodi di turbolenza sociale, i progressi tecnologici, perfino le grandi rivoluzioni scientifiche. Come vedremo, simili avvenimenti e il funzionamento delle reti in cui hanno luogo tradiscono l'esistenza di pochi, fondamentali processi ubiqui nei sistemi complessi. Ma il particolare forse più interessante è che tali dinamiche si possono comprendere attraverso dei semplici modelli matematici.

Gli uomini della sabbia

«Tutte le grandi azioni e tutti i grandi pensieri hanno un inizio di poco peso» dice Albert Camus nel *Mito di Sisifo*.[18] E di poco peso fu l'inizio quando, nel 1987, tre fisici teorici intrapresero uno strano gioco in un ufficio del Brookhaven National Laboratory, nello stato di New York. Si potrà pensare che, data la loro professione, riflettessero sulle origini dell'universo o cercassero di chiarire gli ultimi misteri della fisica nucleare o della fisica delle particelle. Invece Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfeld dedicavano il loro tempo a obiettivi più prosaici: cercavano di immaginare che cosa sarebbe accaduto se si fossero fatti cadere a uno a uno dei granelli di sabbia su un tavolo.

È tipico dei fisici porre problemi che sembrano elementari, ma che a ben riflettere risultano interessanti. E infatti il gioco dei mucchietti di sabbia ebbe un enorme successo. Quando si accumulano i granelli, si forma un monticello di sabbia sem-

pre più grande, che però ovviamente non può continuare a crescere per sempre. A mano a mano che il mucchio aumenta i fianchi diventano più ripidi, sicché il granello successivo ha più probabilità di provocare una valanga che faccia scivolare la sabbia sul tavolo e induca una diminuzione, anziché un aumento, delle dimensioni generali. Perciò il mucchietto cresce e si riduce alternativamente e la sua sagoma, ora più morbida ora più appuntita, fluttua in continuazione.

Bak, Tang e Weisenfeld volevano capire quelle fluttuazioni: qual era il ritmo tipico di crescita e riduzione del mucchietto di sabbia? Sembra un esercizio da nulla, ma far cadere i granelli uno alla volta non è un'impresa facile. Per trovare le risposte, Bak e i suoi collaboratori si servirono quindi di una simulazione al computer. Programmarono il computer in maniera che lasciasse cadere granelli immaginari su un tavolo immaginario e introdussero una regola molto semplice: i granelli rotolavano giù dal pendio quando il mucchio diventava troppo ripido. Non era come lavorare con la sabbia vera, ma il risparmio di tempo era notevole: secondi anziché giorni. La simulazione era così stimolante che i tre fisici si incollarono al monitor e non se ne staccarono più, ansiosi com'erano di vedere i risultati. E presto cominciarono a notare dei fenomeni curiosi.

Ebbero la prima grande sorpresa quando si posero l'elementare domanda: «Quali sono le dimensioni tipiche di una valanga?». Era possibile prevedere ogni volta l'entità dello smottamento? Condussero un numero esorbitante di esperimenti, contando i granelli di milioni di valanghe di migliaia di mucchi di sabbia; ma non trovarono i dati che cercavano, per il semplice fatto che non c'era una valanga «tipica». Alcune erano formate da un solo granello, altre da dieci, altre ancora da cento o mille. Qualcuna, poi, investiva l'intero mucchio: composta da milioni di granelli, faceva rovinare a valle, cioè sul tavolo, l'intero monticello. In breve, pareva che da un momento all'altro potesse accadere di tutto.

Poniamo di stare camminando per la strada e di chiederci quanto sarà alta la prima persona che incontreremo. Se l'altezza della gente funzionasse come le valanghe, la prima persona

che incontreremmo potrebbe essere alta da un centimetro a un chilometro e, nel caso del centimetro, rischieremmo di schiacciarla come un insetto prima ancora di notarla. E se a seguire lo stesso andamento delle valanghe fosse la durata del nostro tragitto da casa al lavoro? Non potremmo più fare programmi di sorta, perché per il viaggio di ritorno impiegheremmo da qualche secondo a due o tre anni; un'imprevedibilità a dir poco preoccupante.

Per studiare l'imprevedibilità del mucchietto di sabbia, Bak e i suoi collaboratori ricorsero a un espediente, cioè usarono il colore. Immaginiamo di guardare il mucchietto dall'alto e di colorarlo secondo la ripidezza: dov'è relativamente piatto e stabile lo tingiamo di verde, dov'è ripido e «lì lì per franare» lo tingiamo di rosso. Che cosa scoprirono Bak, Tang e Weisenfeld? Scoprirono che all'inizio il mucchietto appariva quasi tutto verde, ma che più cresceva, più vi si infiltrava il rosso. A mano a mano che venivano aggiunti granelli le rosse macchie di pericolo si allargavano, finché il mucchietto era attraversato da una fitta ragnatela di instabilità. A quel punto si era finalmente individuata una chiave di lettura del comportamento delle valanghe: un granello che cadeva su una macchia rossa poteva provocare smottamenti in altri punti rossi vicini e indurre un «effetto domino». Se la rete rossa era rada e tutti i punti instabili erano isolati l'uno dall'altro, il singolo granello non produceva conseguenze gravi, ma se il mucchio era percorso in lungo e in largo dalle ramificazioni rosse, il singolo granello, cadendo, poteva provocare conseguenze del tutto imprevedibili: una semplice pioggerella di sabbia o la valanga dei milioni di granelli di una reazione a catena.

Anche se state pensando che il problema possa interessare solo a un fisico, portate pazienza e vedrete che non è così. La condizione di ipersensibilità in cui si organizza il mucchietto di sabbia simulato al computer è detta «stato critico». Lo stato critico è noto ai fisici da più di un secolo, ma è sempre stato considerato una sorta di *monstrum*, un'anomalia teorica, qualcosa di terribilmente instabile e insolito che insorge solo in circostanze eccezionali. Eppure nel mucchietto di sabbia si presentava regolarmente per effetto dello stillicidio di granelli.[19]

Questo indusse Bak, Tang e Weisenfeld a porsi una domanda provocatoria: se si presentava con tanta facilità nel mucchietto di sabbia, lo stato critico non poteva presentarsi anche altrove? Una ragnatela di instabilità perfettamente equivalente dal punto di vista logico non poteva per esempio interessare la crosta terrestre, le foreste, gli ecosistemi e forse perfino il «tessuto» assai più astratto dell'economia? Pensiamo alle prime rocce che si frantumarono vicino a Kobe o al primo, insignificante calo delle quotazioni da cui partì il crac in Borsa del 1987: non potevano, anche in quei casi, essere stati dei «granelli di sabbia» a provocare il disastro? L'organizzazione peculiare dello stato critico non potrebbe forse spiegare perché l'intero mondo sia soggetto a sconvolgimenti imprevedibili?

Centinaia di fisici hanno studiato il problema per un decennio e compiuto notevoli progressi rispetto agli assunti di partenza.[20] Degli sviluppi e delle sottili evoluzioni della teoria parleremo in seguito, ma il messaggio fondamentale è semplice: l'organizzazione peculiare ed eccezionalmente instabile dello stato critico è ubiqua nel nostro mondo. Negli ultimi anni i ricercatori hanno rilevato la stessa legge matematica nell'andamento dei cataclismi che ho già menzionato, nella diffusione delle epidemie, nella genesi degli ingorghi stradali, nella struttura «a rivoli» degli ordini che i dirigenti trasmettono agli impiegati in ufficio e in molti altri fenomeni.[21] Fulcro del nostro discorso è dunque la scoperta che reti di oggetti disparati, come atomi, molecole, specie, persone e perfino idee hanno la spiccata tendenza a organizzarsi nello stesso modo. Partendo da questa intuizione, gli scienziati hanno finalmente cominciato a capire che cosa determini vari tipi di sconvolgimenti e a riconoscere una regolarità là dove in precedenza avevano visto solo il caos.

È una scoperta non priva di conseguenze; ma prima di analizzarle occorre chiarire che cosa sia o non sia lo stato critico.

Oltre la farfalla

La parola «critico» comincia per «c» e per «c» cominciano anche molti altri termini o espressioni che negli ultimi anni

sono stati in qualche modo collegati ai mercati finanziari o al clima. Prima venne la teoria delle *catastrofi*, poi quella del *caos* e, più di recente, quella della *complessità*. Che cos'ha a che fare lo stato critico con simili teorie?

Se si comprimono delicatamente le due imboccature di una cannuccia come per accorciarla, essa in effetti si accorcerà; ma se si preme più forte si arriverà al punto in cui, all'improvviso, si piegherà. Negli anni Settanta il matematico René Thom elaborò la «teoria delle catastrofi», con cui cercava di spiegare repentini mutamenti di questo tipo. Ma, nonostante il nome provocatorio, la sua teoria ci dice pochissimo sul funzionamento della crosta terrestre, dell'economia o di un ecosistema. In fenomeni che prevedono l'interazione di migliaia o milioni di elementi, l'importante sono l'organizzazione e il comportamento *collettivi*, per comprendere i quali occorre una teoria generalmente valida per le reti di elementi interagenti, cosa che la teoria delle catastrofi non è.

La teoria del caos reca la firma del grande fisico francese Henri Poincaré, vissuto tra il 1854 e il 1912; ma gli scienziati ne compresero realmente l'importanza solo una ventina di anni fa. Se un sistema è caotico, come la pallina che corre lungo il tavolo inclinato del flipper, gli sviluppi futuri sono assai sensibili a ogni minima influenza lungo la strada. All'interno di un comune pallone aerostatico, per esempio, le molecole si muovono secondo la legge del caos: se si dà un buffetto a una sola, in molto meno di un minuto ne saranno influenzate tutte le altre. Nel contesto dell'atmosfera terrestre la teoria del caos ci porta all'«effetto farfalla», ossia a concludere paradossalmente che il battito d'ala di una farfalla in Portogallo può condurre in un paio di settimane all'addensarsi di nubi temporalesche su Mosca.

A causa di quest'eccezionale sensibilità, prevedere il futuro di un qualsiasi sistema caotico è praticamente impossibile; il processo caotico appare assai irregolare anche se in realtà ha alla base leggi molto semplici. I ricercatori hanno rilevato le «firme» matematiche del caos nella fluttuazione di sistemi disparati come i laser, le popolazioni dei conigli e, pare, la frequenza cardiaca delle persone sane. Tra gli ultimi anni Ottan-

ta e i primi anni Novanta alcuni scienziati speravano che il caos potesse finalmente consentire di comprendere anche le violente oscillazioni dei mercati azionari, ma così non fu, e per un motivo semplicissimo.

Pare che la maggior parte dei «profani» associ ormai la teoria del caos all'effetto farfalla. Purtroppo la storia della farfalla, così come viene di solito raccontata, è abbastanza fuorviante. Va sottolineato che finché all'interno di un pallone il movimento delle molecole è caotico, non succede molto. Si è mai visto un temporale all'interno di una mongolfiera? Una farfalla potrebbe battervi le ali per l'eternità senza produrre mai reazioni di rilievo. Perciò il caos, di per sé, non spiega perché una farfalla possa provocare un temporale; spiega invece perché una causa di minima entità possa, in breve tempo, rendere il futuro *diverso nei dettagli* (la posizione di molte molecole) da quello che sarebbe potuto essere. Ma per capire in qual modo cause minime conducano infine a grandi sconvolgimenti, occorre qualcos'altro. In poche parole, è lecito affermare che, sebbene spieghi la semplice imprevedibilità, il caos non spiega la predisposizione agli sconvolgimenti.

Come ho detto, vi è un'altra parola che comincia per «c»: complessità. Per secoli i fisici hanno espresso le leggi fondamentali dell'universo con equazioni immutabili e indipendenti dalla storia, come quelle della teoria quantistica o della teoria della relatività. Va precisato che anche nel pallone aerostatico regna una sorta di eternità, dato che l'aria si trova in condizioni di equilibrio che non mutano. Per contro, nell'atmosfera l'aria è in condizioni di non equilibrio, perché è mossa ed eccitata senza posa dalla luce del sole. Ecco allora un criterio per analizzare l'origine degli sconvolgimenti: distinguere tra quanto accade nei sistemi in equilibrio e quanto accade nei sistemi non in equilibrio. Se nei primi tutto è abbastanza semplice, nei secondi le cose si complicano parecchio.

Le nozioni che possono consentirci di capire sia gli sconvolgimenti sia i concetti alla base del mio libro appartengono a un settore in rapida espansione della fisica del non equilibrio o, per usare il linguaggio oggi in auge, della fisica dei sistemi complessi. Studiando le configurazioni spontanee che evolvo-

no nelle reti di elementi interagenti in condizioni di non equilibrio, forse potremo capire un'immensa gamma di fenomeni naturali, dalla turbolenta atmosfera terrestre al cervello umano. La fisica dei sistemi complessi è un campo nel quale, naturalmente, gli scienziati sono solo al punto di partenza. Ma il rapporto tra stato critico e complessità è semplicissimo: *l'ubiquità dello stato critico può a buon diritto essere considerata la prima scoperta veramente concreta della teoria della complessità.*

C'è però un altro particolare importante da prendere in considerazione. Da quando hanno cominciato ad analizzare i sistemi complessi, i fisici hanno compreso meglio un fatto all'apparenza elementare: nel mondo che ci circonda, la storia è importante. Per gli esseri viventi, che si sviluppano a partire da una singola cellula, la constatazione è ovvia; meno ovvio è che capiamo meglio la durezza di un condotto d'acciaio o la superficie irregolare di un mattone spaccato se conosciamo la storia della loro fabbricazione. Nella mongolfiera la storia conta poco, perché nei sistemi in equilibrio nulla cambia; ma nei sistemi non in equilibrio conta moltissimo. Si può comprendere la struttura assai complessa di un fiocco di neve solo se si ripercorrono tutte le tappe della sua formazione e del suo lento congelamento nell'aria rarefatta.

Sono questi i problemi che tratta la fisica del non equilibrio o dei sistemi complessi che dir si voglia; la fisica, potremmo dire coniando un nuovo termine, *storica.* Se le leggi fisiche sono tutto sommato elementari, perché il mondo è tanto complesso? Perché gli ecosistemi e le economie non sono regolati da equazioni semplici come quelle di Newton? La risposta, in breve, è: perché hanno una storia.

L'importanza della storia

Poiché per descrivere i fenomeni complessi non si possono usare le equazioni indipendenti dalla storia, i fisici hanno deciso di usare al loro posto i giochi matematici al computer. Oggigiorno le riviste del settore sono zeppe di articoli sul funzionamento di queste simulazioni, che analizzano la crescita dei cristalli, la formazione delle superfici accidentate e così via. I

fenomeni sono centinaia, tutti leggermente diversi ma tutti, come nel caso del mucchietto di sabbia, appartengono all'universo dei sistemi non in equilibrio; perciò hanno natura decisamente storica e sono soggetti alla stessa evoluzione di quelli che Francis Crick definì una volta «accidenti cristallizzati». Nel gioco del mucchietto di sabbia, un granello cade accidentalmente in un punto: il mucchietto cresce su quel granello «cristallizzandolo» al proprio interno, e sarà per sempre sensibile al fatto che esso sia caduto lì e non altrove. In tal senso, ciò che accade in quel particolare momento non può più essere cancellato e incide sull'intero corso del futuro.

Se le leggi della fisica non consentissero accidenti cristallizzati, il mondo sarebbe in equilibrio e tutto si troverebbe, come le molecole di gas nella mongolfiera, in uno stato di eterna uniformità e immutabilità. Ma le leggi della fisica permettono che le conseguenze di certi eventi si cristallizzino e alterino così il campo da gioco del futuro; insomma lasciano strada aperta alla storia. Avere accertato l'ubiquità dello stato critico, quindi, rappresenta non solo la prima scoperta concreta della teoria della complessità, ma anche la prima scoperta atta a svelarci il carattere tipico dei fenomeni storici; il che ci riporta al punto di partenza di questo capitolo.

In linea di principio la storia potrebbe essere assai più prevedibile di quanto non sia. In linea di principio non è detto che sia soggetta a grandi sconvolgimenti. Uno degli obiettivi che mi propongo con il mio saggio è di capire perché abbia il carattere che ha; e ho idea che troveremo la risposta nello stato critico e nella fisica del non equilibrio, fisica che, attraverso le simulazioni al computer, studia e classifica i vari processi storici possibili. I molti storici che hanno creduto di trovare nei cicli o nelle tendenze graduali il significato e il senso degli avvenimenti passati hanno usato gli strumenti sbagliati. In realtà, per capire la storia occorre analizzare l'astronomia e soprattutto la fisica dei sistemi complessi, che ci fornisce gli strumenti adatti perché studia specificamente i fenomeni in cui l'evoluzione degli eventi ha un'importanza fondamentale.

Nello stesso anno in cui Bak, Tang e Weisenfeld elaborarono il loro modello matematico, lo storico Paul Kennedy pubblicò

Ascesa e declino delle grandi potenze,[22] un saggio in cui esponeva la teoria che i grandi cicli della civiltà umana siano determinati dal naturale accumulo e dalla naturale esplosione delle tensioni insite nelle relazioni politico-economiche globali. A suo avviso, insomma, le dinamiche storiche erano ben poco influenzate dalle azioni dei «grandi uomini» e corrispondevano semmai alla visione espressa da John Kenneth Galbraith nell'epigrafe di questo capitolo. Gli individui, sosteneva, sono prodotti del loro tempo e nel reagire a influenze potenti non hanno molta libertà d'azione. È nella natura delle cose che la potenza economica di una nazione diminuisca e si estingua: con il mutare dei tempi, certi paesi cercano di conservare un potere che non corrisponde più alla loro impoverita base economica, mentre altri, che si sono arricchiti, pretendono ovviamente di avere un maggior ruolo politico. L'inevitabile risultato è che la tensione cresce e spesso esplode in un conflitto armato, dopo il quale ciascuna nazione torna a esercitare un'influenza adeguata alla sua reale forza economica.

Forse non è un caso se la teoria di Kennedy ricorda sia i processi che interessano la crosta terrestre, dove la tensione si accumula lentamente per poi essere liberata attraverso improvvisi terremoti, sia la simulazione del mucchietto di sabbia, dove i fianchi del monticello diventano così ripidi e instabili da produrre una valanga livellatrice. Vedremo in seguito che le guerre presentano davvero la stessa configurazione statistica dei terremoti o delle valanghe del modello di Bak. Kennedy avrebbe potuto trovare numerose prove a sostegno della sua tesi e un linguaggio più adatto a esporla nella fisica dei sistemi complessi. Ma in fondo ha cercato di esprimere a parole, e in un contesto storico, ciò che lo stato critico esprime con la matematica.

Qualunque lezione gli storici vogliano trarre da simili considerazioni, è indubbio che queste assumono un significato più ambiguo quando si passa a parlare dell'individuo. Se infatti il mondo è in uno stato critico o in una condizione assai affine allo stato critico, anche i fattori più insignificanti possono avere effetti enormi: nelle nostre reti sociali e culturali non può esistere un atto isolato, perché il nostro mondo è struttu-

rato (non da noi, ma dalle forze di natura) in modo tale da registrare e amplificare a livello globale anche il più banale degli atti. L'individuo ha, sì, potere, ma un potere che rende inesorabilmente intrinseco il disagio esistenziale, giacché ogni atto individuale, se mai avrà conseguenze rilevanti, le avrà del tutto imprevedibili. Poniamo che in questo momento stia per cadere un granello su un quadrato rosso del campo della storia: chi cercasse di ridurre alla ragione le parti in conflitto potrebbe o avere successo o scatenare una conflagrazione. Nel nostro mondo l'inizio è ben poco connesso con la fine, come notò Albert Camus quando scrisse: «Tutte le grandi azioni e tutti i grandi pensieri hanno un inizio di poco peso».

Ribadirò dunque il concetto che, se si vuole capire meglio il ritmo (o meglio l'aritmia) della storia, si può benissimo studiare l'origine, per esempio, dei terremoti. Se l'ipersensibilità e la predisposizione agli sconvolgimenti sono ubique, non occorre andare lontano per trovarle. Lasciamo dunque da parte per un attimo l'individuo e la storia umana e proviamo ad analizzare la realtà più semplice degli oggetti inanimati. Scendiamo nel sottosuolo e vediamo cosa accade nel mondo oscuro e roccioso che si cela sotto la superficie terrestre. Potrà stupire, ma nei turbolenti meandri del nostro mutevole pianeta troveremo il modello di innumerevoli sistemi.

II

Misteri sismici

«Scienza» è l'insieme di tutte le ricette che hanno regolarmente successo. Tutto il resto è letteratura.

Paul Valéry[1]

Fin da quando cominciai a interessarmi di sismologia, ho avuto orrore delle previsioni e di chi le faceva. I giornalisti e il pubblico di massa si buttano su ogni minimo presagio di terremoto con la famelicità di maiali al truogolo.

Charles Richter[2]

Chi si fosse trovato a camminare per le strade centrali di St Louis negli ultimi giorni di novembre del 1990 non avrebbe potuto fare a meno di stupirsi. Mancava meno di un mese al Natale e i negozi avrebbero dovuto essere gremiti di gente che comprava regali e decorazioni per l'albero; invece i grandi magazzini erano vuoti e le vie quasi deserte. L'attività ferveva altrove, nei supermercati e nelle ferramenta dei sobborghi, dove milioni di persone non si stavano preparando a una bella vacanza natalizia, ma a sopravvivere all'imminente disastro. Anziché acquistare regali, la popolazione faceva incetta di acqua minerale, scatolame, candele, torce elettriche, coperte, badili e generatori. Era scritto su tutti i giornali e ormai pareva una certezza: entro i primi cinque giorni di dicembre la città sarebbe stata colpita da un violento terremoto.

Gli abitanti di St Louis non erano gli unici sull'orlo di una crisi di nervi. Quell'inverno in tutti gli Stati Uniti centrorientali, soprattutto Illinois, Arkansas e Tennessee, la gente era in preda al panico e faceva frenetici preparativi per il futuro. Le autorità comunali e statali avevano varato piani di emergenza

in vista della catastrofe imminente: le scuole sarebbero state chiuse in parecchi stati e le squadre di soccorso si sarebbero tenute pronte a intervenire. Si erano organizzati eserciti di volontari a cui sarebbero stati affidati compiti specifici, come distribuire l'acqua, installare ospedali da campo e aiutare i pompieri. Nella sola St Louis i funzionari prevedevano almeno trecento vittime e danni agli edifici per oltre seicento milioni di dollari.

Il terremoto era stato previsto da un certo Iben Browning, «climatologo e consulente finanziario». Browning aveva una laurea in scienze e forse per questo i media lo presero così sul serio (anche se la sua specializzazione era in biologia). Nei primi cinque giorni di dicembre, aveva dichiarato, il sole, la terra e la luna si sarebbero trovati in un raro allineamento, gli effetti di attrazione gravitazionale si sarebbero sommati producendo un'ampiezza di marea che avrebbe esercitato una tensione insostenibile sulla faglia di New Madrid. Insomma ci sarebbe stato uno spaventoso terremoto. Il Missouri spese duecentomila dollari per premunirsi contro il disastro e a St Louis i proprietari di case sborsarono un totale di ventidue milioni di dollari per aumentare la loro copertura assicurativa. Ma naturalmente il Grande Terremoto del 1990 non ci fu.

Per tutta la durata della Grande Bufala, autorevoli scienziati dello US Geological Survey e delle università della regione continuarono a ripetere che la previsione era priva di fondamento scientifico, e in un documento accusarono Browning di essere

> saltato alle conclusioni senza avere prima raccolto prove attendibili e senza avere verificato le ipotesi con il metodo sperimentale che ha permesso alla vera scienza di conquistare prestigio e successo.[3]

Diversamente da Browning, i geofisici degni di questo nome sono cauti fino alla paranoia quando si tratta di prevedere fenomeni sismici. Sono prudenti non solo perché hanno il senso della responsabilità e temono di provocare disagio sociale con previsioni avventate, ma anche perché, nel corso del tempo, hanno registrato una lunga serie di imbarazzanti insuccessi. A tutt'oggi, dopo un secolo di ricerche, i terremoti giungo-

no quasi sempre imprevisti. Ho già spiegato che il grande sisma di Kobe arrivò come un fulmine a ciel sereno; eppure il Giappone da molto tempo finanziava un programma di controllo sismologico. Ancor più imbarazzanti sono i terremoti che gli esperti hanno previsto e che, come quello di St Louis, non sono mai avvenuti.

L'inaffidabilità delle previsioni

Alla fine degli anni Settanta gli scienziati giapponesi erano sicuri che presto un violento terremoto avrebbe colpito l'area di Tokai, nel Giappone centrale. Scrisse un ricercatore nipponico:

> Nel nostro paese molti sismologi, ingegneri sismici e funzionari nazionali e regionali responsabili della protezione civile sono convintissimi che un forte sisma di magnitudo 8 colpirà tra breve l'area di Tokai ... nel Giappone centrale tra Tokyo e Nagoya ... La regione ha registrato numerosi gravi terremoti nel corso della storia: si pensi a quelli del 1854 e 1707 ... L'intervallo medio fra un sisma e l'altro nella zona è di circa 120 anni; poiché sono passati più di 120 anni dall'ultimo terremoto, c'è motivo di credere che il prossimo sia imminente.[4]

Il ragionamento era semplice: si riteneva che i sismi seguissero un andamento ciclico. Se una regione attraversava un periodo di riposo superiore all'intervallo medio, si giudicava imminente un nuovo terremoto. Convinte della giustezza dell'assunto, negli anni Settanta le autorità giapponesi inaugurarono un sistema di preallarme: in presenza del minimo dato sismico sospetto, si sarebbe riunita una commissione che avrebbe valutato il rischio e deciso se chiudere autostrade, scuole, fabbriche e reattori nucleari. Da allora i giapponesi hanno effettuato una prova generale di allarme sismico una volta all'anno, nell'anniversario del grande terremoto di Kanto del 1923. Ma sono trascorsi decenni e non si è registrata la benché minima scossa nell'area di Tokai. D'altra parte il sisma di Kobe colpì una zona in cui il rischio era giudicato minimo dalle autorità.

Nel 1976 Brian Brady, del Dipartimento miniere degli Stati Uniti, avvertì che, preceduti nel giugno del 1981 da una pre-

scossa di magnitudo 7,5 o 8, due spaventosi terremoti di magnitudo compresa tra 8,8 e 9,8 avrebbero colpito la costa del Perú nell'agosto del 1981 e nel maggio del 1982. Cinque anni dopo, umiliato, dovette rimangiarsi la previsione, ma il governo peruviano era ormai così allarmato che un funzionario dell'US Geological Survey dovette recarsi sul luogo per placare gli animi.[5]

Il fallimento delle previsioni è stato la regola anche in tempi più recenti. Nel 1995 il preside della facoltà di geologia dell'università della California del sud annunciò che un violento sisma avrebbe colpito la California centrale in primavera o all'inizio dell'estate di quello stesso anno,[6] ma si sbagliò.

Ho qui citato previsioni fatte da geologi e geofisici di livello accademico, ma naturalmente a queste vanno aggiunte le numerose false profezie di «profani» come Iben Browning. Nel 1974 due sismologi dilettanti pubblicarono un libro in cui scrivevano:

> Da un'impressionante serie di prove, note da decenni ma finora mai collegate da nessuno, risulta chiaro che nel 1982 la regione losangelena della faglia di San Andreas sarà colpita dal terremoto più violento che si sia mai registrato in questo secolo in un'area abitata della terra. Le prove mostrano che la causa diretta del disastro sarà un raro allineamento di pianeti del sistema solare.[7]

Questo genere di profezie fa tornare in mente la battuta di Mark Twain sulla congettura in *Vita sul Mississippi*: «Il bello della scienza è che permette di ottenere un gigantesco rendimento in congettura da un minimo investimento nei fatti».[8]

Una previsione seria dovrebbe specificare il giorno, la località e la scala della perturbazione sismica. Poiché chiudere scuole e fabbriche ed evacuare città costa parecchio, un sismologo ha valutato che una previsione utile «dovrebbe avere 50 probabilità su cento di cogliere nel segno, e sbagliare al massimo di un giorno nella scala temporale e di 50 chilometri in quella spaziale».[9] Bisognerebbe inoltre che gli esperti indovinassero con buona approssimazione la scala del sisma. Superfluo dire che simili informazioni sarebbero di enorme beneficio per gli abitanti della regione interessata.[10]

Quanto siamo vicini a elaborare previsioni così precise? Og-

gi gli scienziati dispongono di sofisticate apparecchiature che permettono di misurare al centimetro lo spostamento in senso verticale o orizzontale di porzioni della crosta terrestre, ma nel 1997, quando fece il punto sulle previsioni sismiche, il geofisico Robert Geller, dell'università di Tokyo, fu costretto a conclusioni pessimistiche:

> Da oltre un secolo conduciamo ricerche sui terremoti senza alcun significativo successo. Ogni volta che abbiamo annunciato progressi, siamo stati smentiti. Analisi di ampio respiro non hanno permesso di rinvenire indizi sicuri di sismi imminenti. In sostanza, sembra impossibile riuscire a prevedere le perturbazioni più gravi.[11]

Se la scienza è «l'insieme di tutte le ricette che hanno regolarmente successo» e il resto è letteratura, dobbiamo concludere che non esiste una scienza, ma solo una letteratura sismica. Un intero secolo di studi non è servito a nulla. È dunque assolutamente impossibile arrivare a previsioni attendibili in questo campo?

Missione impossibile?

«Non esiste al mondo previsione più errata e falsificata di quella che afferma che qualcosa di teoricamente possibile ... non si verificherà o non potrà verificarsi mai»[12] ha scritto Peter Medawar in *Pluto's Republic*. Forse il discorso è valido anche per le previsioni sismiche. Una delle nostre credenze più profonde riguardo al mondo naturale è che i grandi eventi non nascano dal nulla, ma siano preparati da condizioni speciali e insolite. Se c'è una grossa esplosione nel centro di una città, presumiamo che in precedenza sia stata collocata in loco una notevole quantità di esplosivo.

Quando analizzano il passato, gli storici si pongono numerosi obiettivi. Certo, discutono da secoli del metodo e degli scopi della ricerca, ma perlopiù cercano di capire le cause e le condizioni generali che prepararono avvenimenti come le guerre e le rivoluzioni in determinati ambienti e determinati momenti; riconoscere tali condizioni potrebbe infatti evitare il ripetersi di eventi analoghi in futuro. Nello stesso modo,

quando un violento terremoto colpisce un'area o un vulcano erutta all'improvviso, i geofisici cercano delle risposte. Quali sono state le cause? Nelle rocce erano forse rilevabili segni premonitori? Alcune eruzioni vulcaniche risulta che siano state precedute da fenomeni preliminari. Si pensi per esempio alla grande eruzione del 1980 nello stato di Washington, quando «emissioni di gas e vapore, deformazioni di un metro al giorno visibili nel terreno e molte piccole scosse»[13] prelusero alla devastante esplosione che spaccò in due il Monte St Helens. Grazie a questi fenomeni, le autorità poterono mettere in guardia la popolazione un mese prima.

Per oltre un secolo i geofisici hanno cercato analoghe tracce che preannunciassero i sismi più violenti: hanno cercato, cioè, fenomeni rilevabili costantemente qualche tempo prima della perturbazione. Partivano dal presupposto che i terremoti, per così dire, «mandassero un telegramma per annunciare che avrebbero colpito» e che noi dovessimo solo reperire gli strumenti per individuare e leggere il messaggio. L'assunto è più che ragionevole, ma ha una pecca di fondo: nessuno ha mai trovato un segno premonitore affidabile. Secondo alcuni ricercatori, strane correnti elettriche percorrerebbero il suolo poco prima di un violento sisma e il livello dell'acqua freatica subirebbe improvvise alterazioni; secondo altri, cani e buoi si comporterebbero in modo strano, il clima subirebbe stranissime fluttuazioni e, in certi casi, si scorgerebbero misteriose luci in giro. È possibilissimo che simili fenomeni siano stati osservati realmente, ma per essere utili devono presentarsi in occasione di tutti o quasi tutti i terremoti.[14] Nell'articolo con cui, nel 1997, fece il punto della situazione, Geller, dopo aver citato oltre settecento relazioni scientifiche e spiegato che molti autori sostenevano di avere identificato un segno premonitore, concluse tristemente che non uno di essi era attendibile.

Cicli astronomici

Forse, quindi, non vi sono segni premonitori; ciò non significa però che non si possano prevedere alcuni terremoti. Spesso, nei fenomeni di natura, rileviamo delle regolarità. Si pensi

al sole, alla lune, ai pianeti, ai giorni: viviamo in un mondo di cicli ripetitivi, molti dei quali di origine astronomica. Che seguano un ciclo del genere anche certi sismi? Se così fosse, in un luogo in cui i terremoti si ripetono periodicamente, una previsione dovrebbe essere possibile. I geologi elaborarono questa ipotesi apparentemente plausibile a metà degli anni Ottanta e così, senza rendersene conto, si avviarono incontro a uno dei loro più demoralizzanti insuccessi.

La faglia di San Andreas attraversa la costa occidentale della California e per tutta la sua estensione appare, dall'alto, come una linea diritta che corre da nord a sud lungo le colline. La roccia del lato occidentale avanza verso nord di due o tre centimetri all'anno rispetto alla roccia del lato orientale; lo stato della California, quindi, non è costituito da un unico blocco monolitico di roccia, ma da due blocchi che scorrono lentamente l'uno rispetto all'altro. Il movimento di solito non è visibile, perché i due labbri della faglia stanno attaccati per attrito come un mobile sta attaccato al pavimento quando si cerca di spostarlo da un capo all'altro della stanza. Se però si spinge il mobile con violenza, alla fine scivolerà avanti tutto in una volta, con uno scatto improvviso. Lo stesso accade alle due masse di crosta terrestre lungo la faglia di San Andreas: di solito stanno attaccate, ma ogni tanto scivolano, provocando un terremoto.

Nel 1979 il geofisico William Bakun e alcuni suoi colleghi dello US Geological Survey di Menlo Park, in California, notò un dato interessante mentre studiava i sismi che si erano succeduti in un piccolo segmento della faglia di San Andreas presso la comunità rurale di Parkfield, 240 chilometri a sud di San Francisco. Un terremoto aveva colpito il paese nel 1966, un altro nel 1934 e altri ancora, più lontani nel tempo, erano avvenuti negli anni 1922, 1901, 1881 e 1857. Calcolando la durata degli intervalli, i ricercatori dell'US Geological Survey trovarono la sequenza 24, 20, 21, 12 e 32. Non solo comparivano spesso cifre vicine a 20, ma l'intervallo medio risultava di 22 anni. C'era un altro dato interessante. I geofisici misurano l'intensità dei terremoti con la scala Richter, che dà l'ampiezza delle onde registrate nei sismogrammi: una magnitudo di 5 o

6,4 indica con quanta violenza la terra tremi vicino al centro del sisma o, il che è equivalente, quanta energia venga liberata dalla perturbazione.[15] Bakun e i suoi colleghi notarono che tutti i terremoti di Parkfield erano stati di magnitudo compresa tra 5,5 e 6, e dedussero con sicurezza che fossero dovuti a un processo ciclico e ripetitivo. Forse, pensarono, occorrevano ventidue anni perché la tensione si accumulasse fino al punto di rottura, cioè fino al punto in cui i labbri della faglia cedevano, scivolando.

Presto i geofisici del mondo intero si convinsero che il segmento della San Andreas di Parkfield fosse l'equivalente sismico dell'Old Faithful, il famoso geyser del parco di Yellowstone che emette acqua bollente ogni ora, e ipotizzarono che colpisse con la precisione di un orologio ogni ventidue anni. Poiché l'ultimo terremoto c'era stato nel 1966, quello successivo avrebbe dovuto verificarsi nel 1988. La sismologia sembrava finalmente sul punto di compiere il tanto atteso passo avanti[16] che le avrebbe permesso di formulare previsioni valide. Così, dopo che a un simposio internazionale gli esperti ebbero giudicato ragionevole la previsione di Bakun e colleghi, il direttore dell'US Geological Survey compì un gesto insolito: il 5 aprile 1985 dichiarò pubblicamente che entro i successivi cinque o sei anni un sisma avrebbe colpito la zona di Parkfield.[17] Portandosi appresso le apparecchiature di monitoraggio più sofisticate del mondo, i sismologi percorsero le colline della regione e si misero in attesa. Nel 1986 il dipartimento di scienze geologiche del Consiglio nazionale delle ricerche degli Stati Uniti riassunse il clima di estrema fiducia che si era diffuso tra gli scienziati del settore:

> In nessun'area del mondo la previsione del sisma appare così sicura come a Parkfield. Studi effettuati negli ultimi dieci anni dimostrano infatti come lì, in un segmento della faglia di San Andreas lungo 25 chilometri ... vi sia il 95 per cento di probabilità che si verifichi un terremoto di magnitudo 6 negli anni compresi tra il 1986 e il 1993.[18]

Il dado era tratto. Nel 1987 l'«Economist» definì Parkfield «la potenziale Waterloo dei geofisici»; se il sisma non avesse colpito l'area, scriveva, «i terremoti sarebbero risultati ancora

una volta imprevedibili e la scienza avrebbe registrato una clamorosa sconfitta per la quale non ci sarebbero state scuse valide, visto che si era tesa un'imboscata alla faglia col massimo dispiegamento di forze».[19]

E ahimè, con sgomento dei geofisici, proprio una Waterloo avvenne: per l'ennesima volta il preallarme risultò un falso allarme. Nonostante la serie incredibilmente regolare dei trascorsi sismi, nessun terremoto di magnitudo 5,5 o 6 ha colpito finora l'area di Parkfield. Se anche ne arrivasse uno adesso, sarebbe troppo tardi e la previsione resterebbe errata.

I ricercatori furono tratti in inganno dal desiderio assai umano di individuare cicli regolari anche là dove non ce ne sono. Sulla terra le zone sismiche studiate dai sismologi sono molto numerose. Supponiamo che le scosse colpiscano a caso, senza alcun modello riconoscibile, ha osservato il geofisico Yakov Kagan dell'università della California a Los Angeles:[20] ciò non esclude che ogni tanto in una determinata area si produca per caso una serie di terremoti a cadenza regolare. Parkfield non era che questo.

Considerata la scoraggiante serie di insuccessi, bisognerà concludere, almeno per il momento, che i geofisici sono stati sconfitti. Quasi tutti ammettono che non sono stati rinvenuti segni premonitori affidabili e che non è ancora possibile prevedere perturbazioni specifiche.

La grande palla di fango

Pare dunque che ciò che gli storici dicono della storia umana valga anche per il funzionamento della crosta terrestre. Le grandi guerre e rivoluzioni non seguono un ciclo preciso e non si preannunciano con un telegramma. Le condizioni che le precedono sono sempre diverse e nessuno è mai riuscito a riconoscere segni premonitori affidabili. Ha scritto lo storico Richard Evans:

> La storia non rivela ciò che succederà in futuro, perché non si ripete mai; nella società umana ... niente accade due volte con le stesse identiche premesse e nello stesso identico modo.[21]

Altrettanto può dirsi dei terremoti: non seguono cicli, non danno preavvisi, non lanciano segni premonitori. La terra trema quando le va di tremare.

Gli scienziati sono capaci di prevedere, almeno in maniera approssimativa, dove e quando colpirà un uragano e quanto distruttivo sarà. Conoscono inoltre le condizioni atmosferiche che preannunciano un tornado e sanno capire quando un grande fiume sta per straripare. Nell'uno e nell'altro caso basta riconoscere i segni rivelatori (nubi temporalesche, venti e piogge) e suonare l'allarme appena la situazione pare volgere al peggio. I meteorologi prevedono con un buon grado di successo – e con un anticipo di qualche giorno – anche il tempo atmosferico. Perché nel caso dei terremoti le anticipazioni paiono scientificamente impossibili?

Per trovare una risposta bisogna analizzare meglio la tensione che si accumula naturalmente all'interno della crosta terrestre e che viene liberata con i sismi. Oggi che conoscono benissimo il meccanismo dei sismi, i geofisici si sentono tanto più frustrati dall'insuccesso delle loro previsioni. Gli storici hanno tutti i diritti di stupirsi davanti a un avvenimento, perché il comportamento umano è sempre un grande mistero; il fenomeno sismico, invece, non è né misterioso né quantistico (nel mondo dei quanti la casualità intrinseca renderebbe inconcepibile qualsiasi previsione). Ciò che avviene nel suolo è del tutto deterministico e, in teoria, perfettamente prevedibile: in pratica, ci sono dei blocchi rocciosi che premono contro altri blocchi rocciosi.

Per farci un'idea di come siano l'interno e l'esterno del nostro pianeta, proviamo a immaginare una grande palla di fango umido posta ad asciugare all'aria calda. Dopo qualche tempo la superficie si seccherà, formando una crosta, mentre il fango sottostante resterà liquido. La differenza è che, mentre il liquido all'interno della palla sta fermo, quello all'interno della terra si muove. Se con un mezzo ingegnoso potessimo scuotere il fango liquido al centro della palla e farlo fluire sotto la superficie, otterremmo un modello rudimentale della terra. Il nostro mondo ha un involucro esterno di duro materiale

roccioso – la crosta – che copre il materiale incandescente e fuso del sottostante mantello.

Il movimento è indotto dal tremendo calore che si sviluppa all'interno del pianeta. Ovviamente la materia più calda tende a salire e quella più fredda a scendere,[22] sicché la crosta terrestre galleggia sul profondo oceano del mantello, che comprende vaste sottocorrenti. Essendo solida, la crosta non può muoversi con la libertà dell'involucro fuso e incandescente, e si è frantumata in enormi piattaforme che galleggiano sulla superficie come gigantesche zattere. La moderna teoria che studia tali spostamenti si chiama tettonica a placche o a zolle: le «placche» o «zolle» sono infatti i segmenti di crosta terrestre spessi ciascuno qualche centinaio di chilometri.

In alcune aree le placche collidono frontalmente. Questo accade per esempio nel suolo del Giappone, dove se ne incrociano tre. In altre regioni, come la California, due zolle «fregano spalla a spalla» per un'intera, lunga linea di confine. La zolla pacifica corre lungo la maggior parte dell'oceano Pacifico e la piccola scheggia di California a ovest della faglia di San Andreas. A est della San Andreas la crosta appartiene invece alla zolla nordamericana, che corre lungo tutto il Nordamerica e la metà occidentale dell'oceano Atlantico. La placca nordamericana si sta spostando lentamente verso sud, mentre la pacifica si sta dirigendo a nord, sicché lungo l'intera faglia si registra un colossale «testa a testa».

Il meccanismo fondamentale dei terremoti è semplice. Come ho già spiegato, il sisma avviene quando i due blocchi rocciosi di una frattura, anziché restare incollati per via dell'attrito, scivolano l'uno rispetto all'altro. Nel corso del tempo la tensione si accumula deformando le rocce e, allorché supera la soglia critica, le due masse scivolano improvvisamente nell'ipocentro del sisma. Nella faglia di San Andreas il fenomeno si ripete da quindici o venti milioni di anni.

I geofisici sanno bene che i terremoti avvengono ovunque due o più placche entrino in contatto. Se si prende un mappamondo e si segnano con un punto nero tutte le località in cui si sono registrati i maggiori sismi dell'ultimo secolo, si troverà una configurazione molto interessante: sciami di punti appa-

riranno in tutti i confini tra zolle. Anzi, a mano a mano che diventano fitti, i punti formano lo schema di tutte le fratture del pianeta, cioè dei rozzi contorni delle placche.

Certo, i geofisici definirebbero semplicistica tale descrizione, perché le zolle vanno incontro ad altri fenomeni oltre a quelli appena illustrati: in alcune regioni si allontanano l'una dall'altra per fare spazio al materiale incandescente che emerge dall'interno della terra, in altre scivolano una sotto l'altra, sicché una parte di crosta è rispedita giù a farsi riciclare nel crogiolo fuso del mantello. Sul nostro pianeta le grandi placche sono otto; a queste se ne aggiungono diverse minori, e tutte si spostano per la sotterranea azione propulsiva delle correnti del mantello.

Benché l'unico motivo dei terremoti sia il fatto che la frattura a un certo punto non è più immobilizzata dall'attrito, la struttura generale della crosta terrestre è assai complessa, e non solo per via delle numerose zolle. Ogni zolla è composta da centinaia di rocce di differenti tipi: in alcune aree la roccia è forte, in altre è debole. Non vi sono al mondo due sole zone sismiche perfettamente uguali; probabilmente non vi è nemmeno un solo tipo di previsione sismica, forse perché il problema muta con il mutare delle zone. Il quadro si complica ulteriormente se si pensa che tutte le faglie che percorrono la superficie terrestre interagiscono: lo slittamento lungo una influisce su ciò che accade lungo un'altra. Data la complessità della situazione, c'è da stupirsi se non si possono fare previsioni?

Rumore di fondo

A complicare la faccenda ci sono i piccoli terremoti. Ce ne curiamo poco perché sono poco appariscenti, ma in realtà sono frequentissimi. Visitando il sito web dell'US Geological Survey[23] si trova la lista aggiornata di tutti i sismi che hanno colpito la californiana faglia di San Andreas negli ultimi giorni, settimane e perfino ore. I sismografi dell'ente inviano dati al sito subito dopo aver registrato le scosse. Naturalmente si tratta di perturbazioni di cui non sentiamo parlare al telegiornale, perché hanno magnitudo inferiore a 3. Va tenuto presen-

te che un terremoto di magnitudo 3 è diecimila volte meno violento di uno di magnitudo 7 e non farebbe cadere nemmeno una mosca dal vetro della finestra. Per esempio, il 30 agosto 1999, una giornata media, ben ventidue sismi colpirono varie aree della California, ma solo uno raggiunse la magnitudo 3. Ogni volta che c'è un microsisma, i due labbri della faglia scivolano come nei macrosismi, ma si discostano solo per un tratto breve, dell'ordine di una frazione di millimetro.

Sorge allora una domanda: perché certi terremoti sono impercettibili e altri sono violenti? La risposta più ovvia sarebbe che nei primi lo slittamento è assai minore che nei secondi; ma non è una vera risposta, in quanto non spiega che cosa produce la differenza tra slittamenti. Come vedremo, mezzo secolo di ricerca ha dato al problema una risposta paradossale, che spazza via come cortina di fumo tutte le ipotesi formulate finora e mostra quanto sia semplice, in realtà, la genesi di ogni sisma.

III
Fallacia del senso comune

> Ricondurre qualche cosa di ignoto a qualche cosa di conosciuto alleggerisce, acquieta, appaga, infonde inoltre un senso di potenza. Con l'ignoto è dato il pericolo, l'inquietudine, la preoccupazione – l'istinto primo mira a sopprimere questi penosi stati d'animo. Primo principio: una spiegazione qualsiasi è meglio di nessuna spiegazione ... L'istinto causale è dunque condizionato e stimolato dal sentimento della paura.
>
> *Friedrich Nietzsche*[1]

> Uno dei massimi servigi resi dalla matematica al genere umano nell'ultimo secolo è stato quello di mettere il «senso comune» nel posto che gli spetta di diritto: lo scaffale più alto vicino al barattolo impolverato con l'etichetta «stupide banalità».
>
> *Eric Temple Bell*[2]

Il 16 dicembre 1811 avvenne il primo di tre terribili terremoti che colpirono la regione di New Madrid, nel Missouri, 240 chilometri a sudest di St Louis. Quel primo sisma fu così violento da far suonare le campane delle chiese perfino a Boston, alterare la geografia di buona parte del Missouri e del Tennessee e far scorrere all'indietro le acque dell'imponente Mississippi. Scrisse un testimone oculare:

> Dopo un boato tremendo che parve un tuono fragoroso e lontano, ma più rauco e vibrante, l'aria fu invasa da un vapore solforoso ... Urlando terrorizzati, gli abitanti si misero a correre all'impazzata, senza sapere che fare e dove andare; quale orrore, poi, sentire le strida degli uccelli, i lamenti delle altre bestie, lo schianto degli alberi che cadevano e il rombo del Mississippi, le cui acque per alcuni minuti scorsero all'indietro.[3]

Quel terremoto e i due che lo seguirono il 23 gennaio e il 7 febbraio furono, nell'insieme, così catastrofici da formare perfino un nuovo lago. Lake Reelfoot, 160 chilometri a nordest di

Memphis, non esisteva nel Tennessee prima del 1811. Come la California, il Tennessee è soggetto allo stillicidio di continui microsismi che gli esseri umani non sono in grado di percepire. Per intensità non sono assolutamente paragonabili alla terribile perturbazione di New Madrid, ma la loro dinamica è identica: sono improvvisi e bruschi slittamenti dei labbri della faglia che liberano energia elastica accumulatasi lungo la frattura.[4] Viene dunque spontaneo chiedersi a che si debba la differenza incredibile tra microsismi e macrosismi. Come può un terremoto che libera l'energia di mille bombe nucleari avere ugual natura di quello cento milioni di volte più debole? Quali sono le condizioni specifiche della crosta terrestre che tendono a provocare un sisma di grande intensità? Sono domande importanti. Nel 1811 il terremoto di New Madrid colpì un'area poco popolata; un cataclisma analogo al giorno d'oggi raderebbe al suolo l'intera Memphis.

Abbiamo visto come, agli inizi del Novecento, gli storici fossero turbati e sconcertati dalla prima guerra mondiale, sia perché era costata moltissimo in termini di vite umane sia perché era scoppiata all'improvviso dal nulla. Nessuno ne aveva percepito le avvisaglie, anche se naturalmente, a posteriori, fu più facile formulare ipotesi sulla genesi del disastro. In tempi recenti Francis Fukuyama ha addirittura suggerito che vi abbia avuto parte la noia:

> In Europa molta gente voleva la guerra semplicemente perché era stufa di una vita vuota e priva di ogni senso comunitario. Parlando delle decisioni che portarono alla guerra, la maggior parte degli storici concentra la propria attenzione sui calcoli strategici, senza tener conto dell'enorme entusiasmo popolare che servì a spingere tutti i paesi alla mobilitazione ... A proposito delle folle berlinesi un testimone scriveva: «Nessuno conosce l'altro, ma tutti sono afferrati da un sentimento prorompente: guerra, guerra, e da un senso di solidarietà».[5]

Tutti abbiamo il «sano» desiderio di trovare le cause (fossero anche la noia e il senso di vuoto) dei grandi avvenimenti della storia. I geofisici non sono diversi, ma, per quanto riguarda i terremoti, sono ormai sul punto di rinunciare all'idea di cercare le «condizioni speciali» che li determinano. Per quanto possa apparire sconcertante, non c'è nulla che spieghi

i terremoti più violenti e devastanti; di conseguenza non è possibile prevederli, come dimostrano tutti i fallimentari tentativi finora compiuti. Ma anche la matematica ci porta alle stesse sconfortanti conclusioni. Paradossalmente, da mezzo secolo avevamo davanti agli occhi le prove dell'impossibilità della previsione, eppure soltanto negli anni Novanta abbiamo cominciato a comprendere il loro reale significato.

Fiutare bombe

In genere i geofisici interessati alla previsione dei terremoti studiano uno o più segmenti di faglia per cercare eventuali tracce di prossime perturbazioni. Supponiamo che, nell'ultimo secolo, i labbri della faglia di San Andreas siano slittati in media di un certo numero di metri tranne che in un unico segmento. Potremmo sospettare che a causa di questo «deficit di slittamento» la parte rimasta indietro sia sottoposta a soverchia pressione e si prepari a recuperare il terreno perduto. Negli anni Ottanta alcuni ricercatori credettero di rilevare proprio una situazione del genere in California. Secondo un rapporto steso nel 1983 dallo US Geological Survey, «l'estremità meridionale della zona di frattura del terremoto di San Francisco del 1906 era slittata molto meno delle aree a nord, e quindi c'erano molte probabilità di una frattura entro i successivi decenni».[6]

Quando gli scienziati analizzano una faglia per valutare le probabilità di un terremoto e poi elaborano la loro previsione, in sostanza dicono che la storia della faglia in quella regione, la quantità di tensione accumulata, le proprietà della crosta terrestre e altri fattori lasciano pensare che una «bomba» con la miccia innescata si annidi in loco. A chi chiedesse loro perché un violento terremoto colpì l'area di New Madrid nel 1811 risponderebbero che in una parte della crosta terrestre è scattata la molla: le rocce non avevano liberato abbastanza energia elastica attraverso i microsismi del passato, sicché si era accumulata così tanta tensione da vincere la resistenza per attrito. Un macrosisma, direbbero, è il risultato di una megabomba celata nella crosta terrestre.

In tale quadro si è portati a ritenere che una sezione di fa-

glia rimasta a lungo inattiva abbia più probabilità di registrare intensi movimenti tellurici entro un breve arco di tempo. Si sente spesso dire che l'una o l'altra regione della terra sono «mature per un violento sisma»; ma per quanto sensato e forse perfino logico possa apparire il ragionamento, i dati concreti dimostrano l'esatto contrario. Dagli studi statistici sulla periodicità dei terremoti risulta che più a lungo una regione resta inattiva, più probabilità ha di restarlo anche nell'immediato futuro.[7] I londinesi spesso si lamentano di aspettare un'ora l'autobus 19, per poi vederne arrivare tre tutti insieme. Lo stesso accade con i terremoti: si presentano a gruppi. Attualmente il miglior metodo di previsione consiste forse nell'attendere un sisma e affrettarsi poi a prevederne un altro.[8]

«Fiutar bombe» non è per il momento un metodo efficace di previsione. Può però darsi che gli scienziati non abbiano ancora imparato a capire quale sia l'accumulo di tensione ed energia elastica che determina una «bomba», cioè un esplosivo terremoto. Non è per nulla semplice «leggere» la crosta terrestre e comprendere che cosa costituisca una minaccia e che cosa no. Ma ecco che mezzo secolo fa, Beno Gutenberg e Charles Richter, due sismologi americani del California Institute of Technology, condussero analisi statistiche seguendo tutt'altro metodo. Negli anni Cinquanta dimostrarono che si potevano condurre importanti ricerche geofisiche in biblioteca, senza metter piede sul campo o in laboratorio.

Sappiamo tutti che vi sono microsismi, macrosismi e sismi di media intensità; ma quali sono quelli più comuni? Quali sono, cioè, le dimensioni tipiche di un terremoto? Gutenberg e Richter contavano di trovare qualche dato interessante analizzando statisticamente le perturbazioni. Una volta stabilito il rapporto fra dimensione e frequenza dei terremoti, gli scienziati avrebbero capito, se non dove e quando il futuro sisma avrebbe colpito, perlomeno che intensità avrebbe avuto.

Spulciando centinaia di libri e articoli, i due sismologi raccolsero dati su molti terremoti di varie regioni della terra e annotarono l'intensità di ognuno. Poi contarono quelli di magnitudo compresa tra 2 e 2,5, quelli di magnitudo tra 2,5 e 3 e via dicendo. Misero così insieme una serie di dati indicanti la fre-

quenza relativa di sismi di intensità diversa ed elaborarono il relativo grafico; ma prima di parlarne proviamo a riflettere su quello che potrebbe dirci.

Un'ipotesi è che si ottenga una curva a campana, che è tra le più comuni in campo matematico. Poniamo di sottoporre a un test mille studenti oppure di pesare tutti i maschi adulti di un paesino: scopriremo che i punteggi del test e i pesi degli abitanti descrivono una curva a campana (*figura 1*). La media sarà rappresentata dal picco della curva, dove verrà a trovarsi la maggior parte delle cifre. La curva poi scenderà bruscamente ai due lati dell'asse, perché i voti altissimi o bassissimi e i pesi massimi o piuma sono assai rari. Scopriremo magari che il peso medio degli adulti maschi è di 80 chili e che quasi tutti gli uomini del villaggio hanno un peso compreso tra i 60 e i 100 chili.

Se i valori che stiamo analizzando seguono una curva a campana, in pratica non troveremo mai un valore che si discosta molto dalla media; in altre parole, la media ci dice con sicurezza che cosa dobbiamo aspettarci. Certo, vi saranno persone del peso di 120 chili, ma sarebbe incredibile e assurdo che qualcu-

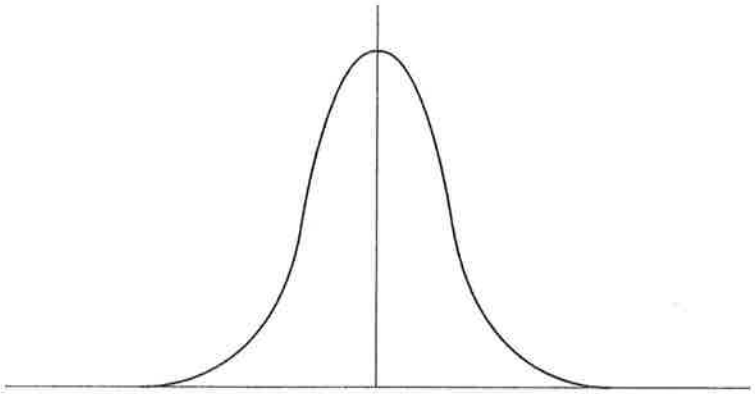


Figura 1. La curva a campana è una delle più comuni. Se si pesano mille mele o cipolle, se si sottopongono a un test cinquecento studenti o se si misura la velocità di alcune migliaia di auto in corsa sull'autostrada, i dati descriveranno una curva a campana, cioè cadranno perlopiù intorno a una media, rappresentata dal picco. Se i dati statistici di un certo fenomeno descrivono una curva a campana, vuol dire che sono raggruppati all'interno di un campo ristretto e che i dati molto divergenti dalla media sono improbabili.

no pesasse 200 o, ancor più, 2000 chili. La curva a campana descrive un'ampia gamma di fenomeni, dai quozienti di intelligenza al gioco dei dadi, e non a caso i matematici la definiscono distribuzione «normale».[9] Che dire dunque dei terremoti?

Se esistesse il terremoto tipico, otterremmo una curva a campana nella quale la maggior parte dei sismi avrebbe una magnitudo normale, cioè media. Certo, insorgerebbero probabilmente delle complicazioni: potremmo per esempio scoprire che i terremoti sono di molti tipi diversi, nel qual caso vedremmo nel grafico parecchie gobbe. Gutenberg e Richter, invece, trovarono una cosa ancor più singolare: una totale assenza di gobbe.

Loro esaminarono un catalogo mondiale dell'epoca, ma un'analisi più recente dei sismi della California del sud ha prodotto la stessa curva liscia regolare, senza gobbe (*figura* 2).

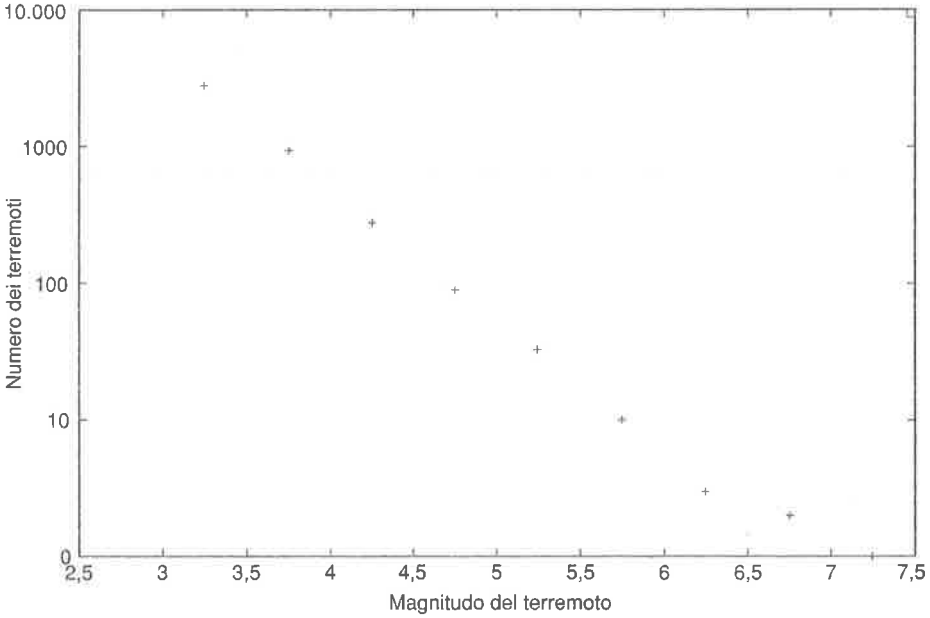


Figura 2. Benché l'energia liberata da ciascun terremoto specifico vari in misura notevole, i dati statistici relativi a tutti i sismi rivelano l'esistenza di una legge molto semplice. Tra il 1987 e il 1996, per esempio, un gran numero di sismi colpì la California meridionale. Le crocette del diagramma indicano quanti ve ne furono delle varie magnitudo: 2,5-3, 3-3,5 e così via. Se si usa come parametro l'energia liberata, i dati indicano che, al raddoppiare dell'intensità, i terremoti diventano quattro volte meno frequenti. (Dati del Southern California Earthquake Data Center, www.sccedc.scec.org.)

A emergere con evidenza è un solo dato: più il sisma è violento, più è raro.

Tale legge non chiarisce che cosa sia tipico in campo sismologico e potrebbe apparire poco significativa. La curva, però, ha una forma speciale e decisamente interessante. Nel grafico sono riportati sull'ordinata il numero di terremoti e sull'ascissa la magnitudo: ricordiamoci che quando la magnitudo aumenta di 1, l'energia liberata aumenta di 10. In termini di intensità, la legge di Gutenberg-Richter enuncia una regola semplicissima: se il sisma di tipo A libera due volte l'energia del sisma di tipo B, il sisma A è quattro volte meno frequente del B. Insomma ogniqualvolta l'energia raddoppia, il terremoto diventa quattro volte più raro; e questa semplice regola vale per sismi di ogni ordine d'intensità.

I fisici definiscono tale genere di rapporto tra dimensioni e frequenza «legge della potenza»; e le leggi della potenza hanno un'importanza enorme rispetto alla loro apparente elementarità. Per capire la ragione della loro importanza, converrà per un attimo lasciar da parte i terremoti ed esaminare invece le patate congelate.

La logica della patata

Le patate congelate sono come rocce: soggette a rompersi e sgretolarsi se subiscono un forte impatto. Se proviamo a lanciarne una contro il muro, ci ritroveremo un mucchio di frammenti di varie dimensioni: alcuni grandi come palle da golf, altri come ciliegie, altri ancora come piselli o semi d'uva. Qual è la dimensione tipica? Per scoprirlo possiamo lanciare contro il muro un migliaio di patate, produrre innumerevoli frammenti e procedere secondo il metodo di Gutenberg e Richter. Prima di tutto suddividiamo i frammenti in mucchi secondo il peso; con pazienza formiamo dieci mucchi diversi, l'ultimo dei quali conterrà frammenti di un grammo circa. Vi saranno naturalmente pezzettini ancor più piccoli e difficili da maneggiare, ma potremo tranquillamente ignorarli. Alla fine tracceremo un grafico riportando sull'ordinata il numero di frammenti di ciascun mucchio e sull'ascissa il loro peso.

I pezzi di patata danno come risultato la stessa curva regolare di Gutenberg e Richter. Il numero di frammenti minuscoli come semi d'uva sarà enorme, mentre calerà gradualmente all'aumentare delle dimensioni dei pezzi. Anzi, noteremo una regolarità nel rapporto tra dimensioni e frequenza: al raddoppiare del peso dei frammenti, il loro numero diminuisce di circa sei volte. È la stessa legge della potenza rinvenuta da Gutenberg e Richter, solo che qui la frequenza è inversamente proporzionale alla dimensione di un fattore di sei, anziché di quattro.

E tutti i frammenti minuscoli che abbiamo scartato? Sono anche quelli pezzi di patata congelata e sarebbe giusto includerli. Potremo allora prendere una lente d'ingrandimento, dividere anche quelli in mucchi ed estendere la distribuzione al reame microscopico. Che cosa scopriremo nella scala delle dimensioni minime? Curiosamente, che i frammenti minuscoli seguono la stessa legge. Più le dimensioni del pezzetto di patata diminuiscono, più aumenta la frequenza in maniera regolare: se il peso si dimezza, il numero si sestuplica. Nel 1993 furono tre fisici dell'università della Danimarca del sud a condurre questo esperimento e a scoprire che la frequenza aumentava di sei anziché di quattro volte.[10] Utilizzarono frammenti che pesavano tra un etto e un millesimo di grammo e accertarono che la legge della potenza valeva per l'intera scala.

Non ho ancora spiegato perché si chiami legge della potenza, ma lo farò tra poco. Prima chiediamoci che conseguenza abbia la regolarità trovata sulla domanda originaria che ci eravamo posti a proposito delle dimensioni «tipiche» o «normali» di un frammento. Immaginiamo di essere una creatura capace di cambiare dimensioni a piacere: con uno schiocco delle dita passiamo istantaneamente dalla grandezza di una ciliegia a quelle di un pisello o di una formica. Una simile prerogativa ci sarebbe di grande vantaggio nel compito di analizzare il mucchio di frammenti. Quali che fossero i pezzi di patata da esaminare, potremmo assumere le loro stesse dimensioni e fare un giro di esplorazione. Supponiamo di cominciare dalla grandezza di un pisello. Ci guardiamo intorno per un poco contemplando il paesaggio e notiamo che alcuni pezzi sono

grandi all'incirca come noi, mentre altri sono leggermente più grandi o più piccoli. Decidiamo poi di ridurci ulteriormente e di diventare dieci volte più piccoli. Ci stupiremo di scoprire che, a questa scala inferiore, le cose hanno lo stesso aspetto di prima. Quando eravamo grandi come piselli avremo forse notato che per ogni frammento del nostro peso ce n'erano sei che pesavano la metà, ma divenuti ancora più piccoli ci rendiamo conto che la storia si ripete: per ogni frammento che pesa come noi ce ne sono sei che pesano la metà. A ogni scala il paesaggio ha lo stesso identico aspetto e se non ci ricordassimo di quante volte ci siamo ridotti, non lo capiremmo certo guardandoci intorno.

Ecco che cosa significa «legge della potenza». Il processo di frammentazione di una patata congelata può essere assai complesso. In effetti la configurazione della frattura è diversa per ogni patata che lanciamo contro il muro, ma nel processo vi è anche qualcosa di elementare, perché il mucchio di frammenti presenta sempre una proprietà specifica: l'invarianza di scala o autosimilarità. Il paesaggio di detriti appare lo stesso su tutte le scale, come se ciascuna parte fosse una minuscola immagine dell'insieme.

In altre parole, si potrebbe anche affermare che nel mucchio di frammenti non vi è una scala «privilegiata» rispetto alle altre. Si tratta, insomma, di una peculiarità davvero singolare. Le galline non depongono mai uova grandi come una palla da basket o piccole come un acaro della polvere: la loro struttura corporea le predispone a produrre uova le cui dimensioni, in un grafico, descriverebbero una curva a campana con il picco rappresentante il valore medio, normale, tipico. Invece nel processo di frammentazione delle patate congelate non vi è predisposizione naturale: i frammenti che vengono prodotti coprono una gamma immensa di scale (anche se, ovviamente, con qualche limite: non si trovano mai frammenti più grandi delle patate intere o più piccoli di singoli atomi).

Dunque la legge della potenza ci dice che non esiste un frammento normale o tipico: ed è, questo, il punto più importante. Occorre però menzionare un particolare tecnico, perché c'è un metodo molto semplice per scoprire quando in un feno-

meno agisca la detta legge. In algebra la legge della potenza è qualunque curva in cui l'ordinata varia proporzionalmente all'ascissa elevata a una data potenza, ovvero moltiplicata per se stessa un dato numero di volte. Per esempio l'equazione

$$\text{ordinata} = (\text{ascissa})^2$$

rappresenta una curva ascendente sempre più ripida. In questo caso specifico la legge della potenza prevede la potenza di due. In campo sismologico, se pensiamo in termini di energia liberata anziché di magnitudo, la curva di Gutenberg-Richter mostrerà che la frequenza dei terremoti liberanti energia E è inversamente proporzionale a E elevato alla potenza di 2, o E^2. Questa specifica legge della potenza, insomma, esprime una regolarità molto semplice: ogni volta che l'energia raddoppia, i terremoti diventano quattro volte (cioè due al quadrato) meno frequenti.

Per scoprire se ci troviamo di fronte a una legge della potenza basta elaborare un grafico della distribuzione dell'oggetto o sistema che ci interessa e poi vedere se la curva corrisponde a tale legge algebrica. Se vi corrisponde, al fenomeno che stiamo analizzando non sono applicabili i termini «normale», «tipico», «anomalo» o «eccezionale». Le leggi della potenza hanno sempre quest'implicazione, qualunque sia l'oggetto dell'analisi. E questo ci conduce alla conseguenza più importante delle osservazioni di Gutenberg e Richter.

Un'unica causa per tutti i sismi

L'invarianza di scala nel mucchio composto da pezzi di patata congelata significa che un frammento grande è solo una versione in scala maggiore di quello piccolo. Pezzi di tutte le dimensioni vengono prodotti nel corso di un processo di frammentazione che opera nell'identico modo su tutte le scale. La legge di Gutenberg-Richter spiega che lo stesso vale per i sismi e per la frattura della crosta terrestre che li provoca. Poiché, in termini di energia liberata, i terremoti sono distribuiti secondo una legge della potenza, la loro distribuzione è a sua volta caratterizzata da invarianza di scala. Niente fa

pensare che i macrosismi abbiano un'origine diversa da quella dei microsismi. Poiché non vi è motivo di pensare che i terremoti catastrofici siano speciali, anche se sembra paradossale si deve concludere che hanno la stessa origine di quelli impercettibili. In altre parole, non ha senso cercare spiegazioni speciali per i sismi violenti, i quali non sono più singolari o insoliti delle scosse infinitesime che si verificano in continuazione e che noi nemmeno sentiamo.

È fondamentale capire che non possiamo trarre una simile conclusione da altro modello matematico che la legge della potenza, e che però la legge della potenza comporta inevitabilmente tale conclusione in merito all'unicità delle cause. La legge di Gutenberg-Richter rende assai improbabile che si possano prevedere con successo i macrosismi; anzi, la stessa ipotesi di previsione dei terremoti è forse del tutto errata e addirittura assurda. Beninteso, con questo non voglio dire che sia impossibile una geofisica dei sismi. Nel V capitolo spiegheremo meglio la legge di Gutenberg-Richter e la nuova, affascinante direzione che ha attualmente imboccato la sismologia; e analizzeremo abbastanza a fondo il preciso significato della frase «i terremoti catastrofici hanno la stessa origine di quelli impercettibili», che suona così strana.

Prima di sviscerare tali argomenti, però, facciamo un attimo un passo indietro e diamo un'occhiata al quadro scientifico generale. Nei primi anni Ottanta gli scienziati delle varie discipline non si erano ancora resi conto del significato profondo della legge della potenza. Da allora una rivoluzione silenziosa ha, senza esagerazioni, rovesciato la visione tradizionale in centinaia di settori.

IV
Accidenti della storia

> Scienza è qualunque disciplina in cui uno stupido della generazione corrente sappia di più del genio della generazione precedente.
>
> *Max Gluckman*[1]

> Il tempo è ciò che impedisce a tutte le cose di accadere simultaneamente.
>
> *John Archibald Wheeler*[2]

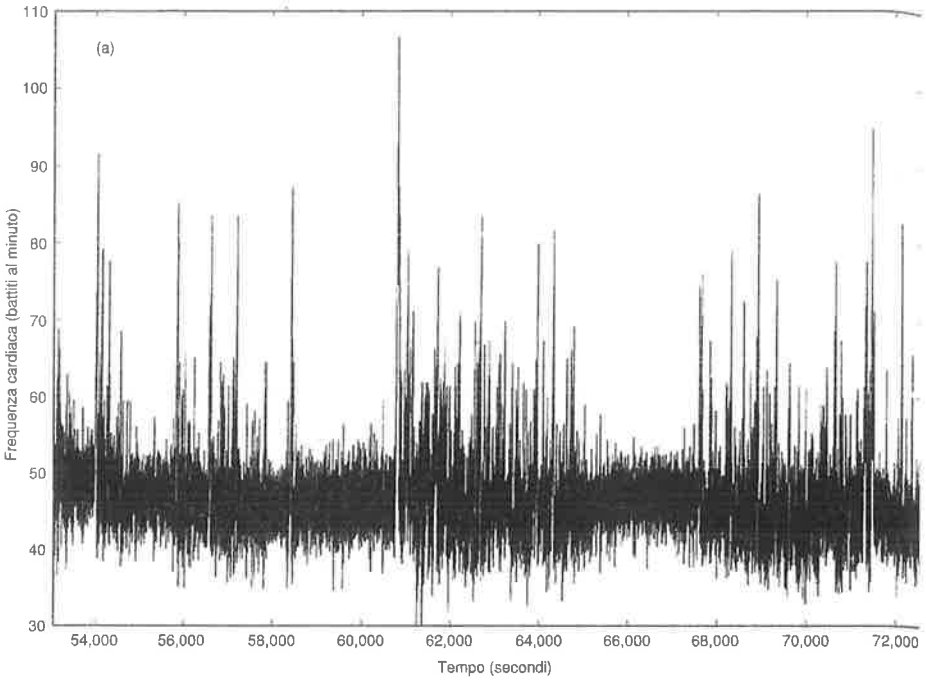
Il filosofo britannico Isaiah Berlin ha definito la storia del pensiero e della cultura «un complesso mutevole di grandi idee liberatorie che si trasformano inesorabilmente in soffocanti camicie di forza».[3] Qualsiasi teoria, per quanto nobile, originale, suggestiva e liberale, alla fine rivela dei limiti. Nella primavera del 1686 Isaac Newton presentò alla Royal Society di Londra il primo libro dei *Principia*, che con la legge di gravitazione universale e le equazioni generali del moto avrebbe indicato una rotta chiara e sicura ai successivi due secoli di navigazione scientifica. Ma nel 1900 il determinismo intrinseco alla concezione newtoniana aveva ormai finito per soffocare e limitare la creatività scientifica.

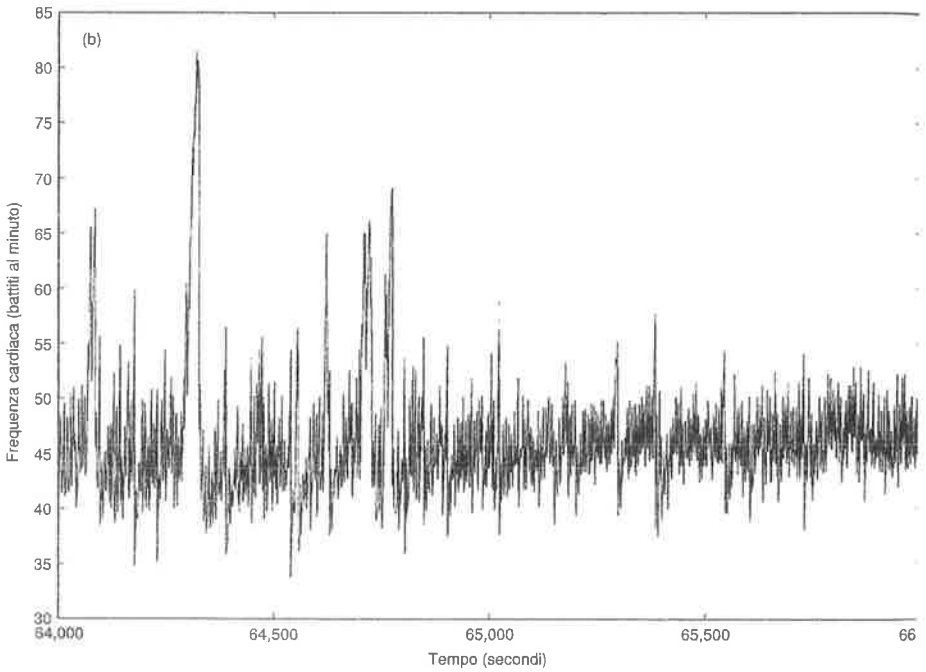
Per i ricercatori che indagavano sull'atomo, la fisica newtoniana rappresentò perlopiù un ostacolo, e alla fine alcuni di loro riuscirono eroicamente a liberarsi delle catene e a elaborare la teoria dei quanti. «Non chiedete da dove viene: viene dalla testa di Schrödinger» disse il fisico americano Richard Feynman a proposito della famosa equazione fondamentale della meccanica ondulatoria. Assieme alle teorie di Niels Bohr, Werner Heisenberg e Paul Dirac, la meccanica ondulatoria di

Erwin Schrödinger liberò ancora una volta gli scienziati dalle pastoie del passato, schiudendo loro nuovi orizzonti. Alla fine degli anni Venti, un universo fatto di fenomeni incoerenti e sconcertanti fu riportato all'ordine naturale.

In tempi più recenti, un matematico che lavorava per l'Ibm avviò una rivoluzione paragonabile a quella quantistica. Nel 1963 Benoît Mandelbrot si mise a studiare le variazioni nelle quotazioni del cotone sul mercato delle materie prime di Chicago. I prezzi del cotone aumentavano e diminuivano in maniera irregolare e benché il grafico delle fluttuazioni relative ad alcuni mesi somigliasse alla cresta di una frastagliatissima catena di montagne, Mandelbrot era convinto di poter trovare un ordine nascosto al suo interno. La documentazione che aveva raccolto riguardava le oscillazioni dei prezzi su tutte le scale temporali: vi erano bruschi alti e bassi relativi alla giornata o perfino all'ora e al minuto, e vi erano tendenze più lente e graduali della durata di settimane o mesi. Il fatto di per sé non era né particolarmente strano né particolarmente significativo, ma Mandelbrot scoprì che se isolava una piccola sezione del diagramma, per esempio quella relativa a un solo giorno, e la allungava fino a renderla estesa quanto l'insieme, essa appariva assai simile al diagramma intero. In altre parole, le fluttuazioni rilevate in un breve arco di tempo ricalcavano quelle rilevate nell'intera ricerca, solo che erano inserite in un intervallo più breve.

Un matematico meno intuitivo l'avrebbe forse giudicata solo una stranezza e sarebbe passato oltre, ma Mandelbrot non era un tipo superficiale. Analizzando le oscillazioni dei prezzi di altri prodotti come l'oro e il grano, rilevò lo stesso andamento e lo rilevò pure negli alti e bassi delle quotazioni di azioni e obbligazioni: ogni minima porzione di grafico sembrava la brutta copia del grafico intero. Nei primi anni Settanta concentrò poi l'attenzione su qualcos'altro. Lasciandosi alle spalle il tumulto della Borsa, studiò la natura e in particolare le reti fluviali e le loro complesse ramificazioni. Era un settore lontanissimo dalla finanza, eppure anche lì egli rinvenne la stessa regolarità. Se si prendeva per esempio la fotografia aerea della rete di corsi d'acqua che alla fine sfociano nel Missis-


(a)
Frequenza cardiaca (battiti al minuto)
110
100
90
80
70
60
50
40
30
54,000
56,000
58,000
60,000
62,000
64,000
66,000
68,000
70,000
72,000
Tempo (secondi)


(b)
Frequenza cardiaca (battiti al minuto)
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
64,000
64,500
65,000
65,500
66
Tempo (secondi)

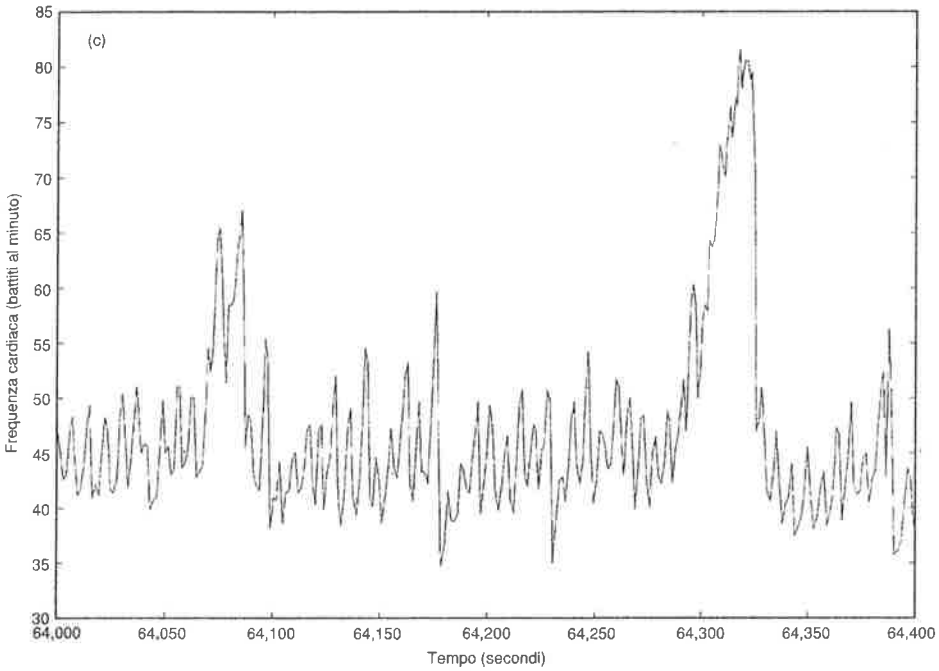


Figura 3. Se pensate che il cuore batta come un orologio, vi sbagliate. In una persona sana anche in stato di riposo, l'intervallo tra due battiti mostra fluttuazioni assai irregolari. Tendenze graduali all'aumento o alla diminuzione della frequenza si manifestano nel corso di ore (a), ma a un esame più attento si osserva che fluttuazioni analoghe si registrano sulla scala dei minuti (b) e addirittura dei secondi (c). (Per gentile concessione di Ary Goldberger, della Harvard Medical School. Riproduzione autorizzata.)

sippi, se ne isolava una parte e poi la s'ingrandiva, l'immagine del frammento appariva quasi uguale a quella intera.

Nei dieci anni successivi Mandelbrot passò innumerevoli ore in biblioteca e parlò con scienziati di tutte le discipline, seguendo la pista intellettuale che aveva per la prima volta imboccato notando la curiosa regolarità delle oscillazioni dei prezzi del cotone. Trovò configurazioni analoghe nelle forme irregolari dei paesaggi montani, nel profilo delle nubi, delle coste e degli alberi, negli orli frastagliati di un pezzo di vetro rotto, nella superficie scabrosa di un mattone frantumato e così via. Per secoli quelle forme irregolari avevano sfidato qualsiasi descrizione scientifica; anzi, parevano assolutamente inafferrabili dalla matematica e in contrasto con gli stessi principi della geometria euclidea. Ma con un libro molto impor-

tante che pubblicò nel 1983,[4] Mandelbrot divulgò la propria innovativa concezione di geometria e aprì nuovi orizzonti agli scienziati. Se si capisce con quale occhio guardare a certi fenomeni, scrisse, questi spesso risultano molto semplici. La chiave di tutto sta nel concetto cui siamo pervenuti esaminando i pezzi di patate congelate: l'autosimilarità.

Gli scienziati hanno ormai scoperto l'autosimilarità negli oggetti e sistemi più disparati, come i crateri della luna, il plancton degli oceani, perfino la frequenza cardiaca umana. Se credete che il cuore «giri» al minimo come il motore di un'automobile ben carburata, vi sbagliate. Qualche anno fa il cardiologo Ary Goldberger della Harvard Medical School e alcuni fisici della vicina università di Boston registrarono per un intero giorno la frequenza cardiaca di un volontario e poi analizzarono i dati. Calcolarono il tempo intercorso tra coppie successive di battiti e produssero una serie di centomila numeri: le cifre più alte di ciascuna serie indicavano i momenti in cui il cuore batteva più lentamente e vi era maggior intervallo tra una pulsazione e l'altra, mentre quelle più basse indicavano i momenti in cui la frequenza aumentava.

Guardando i dati, Goldberger e i suoi colleghi notarono qualcosa di molto simile alla regolarità individuata da Mandelbrot nel grafico dei prezzi del cotone. Vi erano alti e bassi relativi a ore, a minuti, a secondi (*figura 3*). Pare insomma che il cuore umano non voglia saperne di comportarsi sempre nello stesso modo, e che alteri costantemente il proprio ritmo. Goldberger riscontrò un certo grado di autosimilarità anche in quel settore. Se si isolano i dati riguardanti alcuni secondi e li si espande, si scopre che i cambiamenti che avvengono in un arco di tempo così limitato sono pressoché uguali a quelli che si verificano più gradualmente nel corso di minuti o ore. Dietro l'irregolarità, dunque, si cela un ordine singolare, assai diverso da quello che la scienza è abituata ad affrontare.

È un ordine che, naturalmente, ha un nome coniato dallo stesso Mandelbrot: geometria dei frattali; ed è ai frattali e a chi li ha teorizzati che dobbiamo una delle più importanti rivoluzioni scientifiche dell'ultimo ventennio.

I frattali dal passato al presente

In genere, quando ci chiedono di pensare a un elemento geometrico, immaginiamo una linea o un triangolo, figure elementari della geometria euclidea che abbiamo imparato tutti a scuola. I frattali, invece, sono elementi di tutt'altro tipo, forme matematiche dotate di perfetta autosimilarità. Se Mandelbrot fu forse il primo a discernerli nelle strutture della natura, è però vero che alcuni matematici avevano già riflettuto sul concetto già molto tempo prima.[5]

Un semplice esempio di frattale è la curva di von K1och, ideata dal matematico tedesco Helge von Koch nel 1904. Vi si arriva per un processo di iterazione: prima si traccia una linea orizzontale, poi vi si costruiscono al centro i due lati di un triangolo, che appaiono come i due fianchi di una montagna in mezzo alla pianura; si inseriscono quindi altri lati di triangolo in entrambi i segmenti di «pianura» e nei fianchi del «monte» e si continua così. A ciascuno stadio si introducono lati di triangolo al centro di ciascuna linea e si rende così l'immagine sempre più finemente «frastagliata» (*figura 4*). Se si ripetesse l'operazione per un numero infinito di volte, si otterrebbe la curva di von Koch. Naturalmente è impossibile disegnare su un pezzo di carta la vera e propria curva, perché è troppo complessa; il meglio che si possa fare, graficamente parlando, è afferrare il concetto di base.

La curva di von Koch ha una proprietà speciale: comunque la si guardi presenta la medesima struttura.

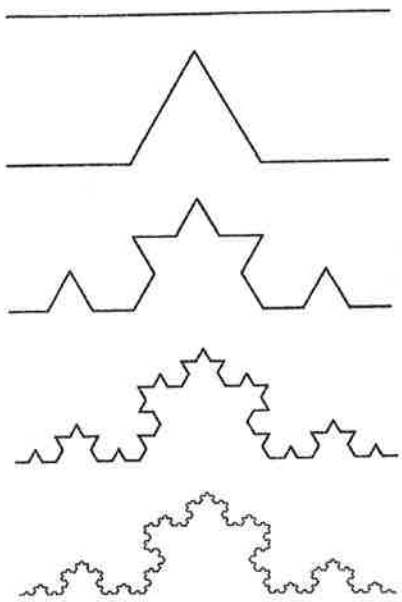


Figura 4. La curva di von Koch è un frattale ottenuto tramite un processo infinito di iterazione.

Anche ingrandendola un milione di volte, si continua a vedere ogni volta la stessa struttura. Certo, l'autosimilarità del frattale è perfetta solo nel frattale matematico perfetto, che non si può disegnare sulla carta. L'immagine della curva di von Koch pubblicata in queste pagine non può contenere dettagli infiniti: a un certo punto, nella scala minima, non è più in grado di accogliere nuovi triangoli e diventa un frattale approssimato.

Proprio come l'immagine stampata, niente in natura è un vero frattale matematico. Nel mucchio di frammenti di patate congelate, per esempio, l'autosimilarità riflessa nella legge della potenza vale solo per i frammenti di peso compreso tra un etto e un milligrammo. Ma è una gamma amplissima – di un fattore di 10.000 – e al suo interno il mucchio è in effetti un frattale. Nemmeno i segmenti di retta o i cerchi sono perfetti in natura, ma ciò non impedisce a tali figure geometriche di descrivere la forma della terra o la traiettoria di un raggio di luce. Analogamente, la matematica dei frattali ci fornisce il linguaggio più adatto a descrivere l'invarianza di scala che si manifesta per qualche motivo in numerosi fenomeni.

L'espressione «per qualche motivo» induce a riflettere su un punto importante. I frattali perfetti dei matematici nascono dal potere della loro immaginazione, ma qual è l'origine di quelli reali? Che cosa li provoca? La geometria di Mandelbrot ci dice che cosa sono i frattali e come l'uno differisca dall'altro, ma nessuna descrizione possibile potrà mai spiegare in che modo una struttura sia diventata com'è. Dire che un paesaggio è un frattale non spiega come o perché sia giunto a esserlo. Come Keplero comprese e descrisse alcune regolarità del moto planetario molto tempo prima che Newton elaborasse i principi fisici che lo generavano, così la scoperta di Mandelbrot rappresentò solo un invito a un'analisi più profonda.

Isole ed elettroni

Che origine hanno i veri frattali? Una delle possibili risposte è il caos, termine che indica cose diverse a seconda delle discipline. Per un ecologo significa che la popolazione di vol-

pi dell'Inghilterra del sud o di un'altra regione può fluttuare da un anno all'altro in maniera del tutto imprevedibile. Per un meteorologo significa che, attraverso le simulazioni al computer, non è possibile prevedere il tempo atmosferico con un anticipo superiore a una o due settimane. Per un fisico impegnato a progettare un acceleratore di particelle significa che gli elettroni da analizzare potrebbero avere la seccante tendenza a uscire dall'anello (nella quale eventualità il caos procurerebbe non solo la fuoriuscita delle particelle, ma anche una bella emicrania a lui).

Poiché in un acceleratore viaggiano a una velocità prossima a quella della luce, gli elettroni percorrono l'anello centinaia di migliaia di volte al secondo: non c'è da stupirsi se occorre un buon meccanismo per mantenerli in orbita. I fisici si servono per questo scopo di grandi magneti che sono disposti lungo il tunnel e che riportano in carreggiata gli elettroni che cominciano ad andare per i fatti loro. Ma il campo magnetico non funziona sempre. La prima volta che percorre l'anello, un elettrone può spostarsi leggermente di lato; se il processo che sta alla base di questo spostamento è caotico, come a volte è, le impercettibili alterazioni nella traiettoria si accumuleranno assai rapidamente e alla fine indurranno l'elettrone a schizzar fuori dell'anello.

Alla fine degli anni Settanta il fisico americano Brian Taylor e il suo collega russo Boris Čirikov idearono in maniera indipendente un semplice modello matematico che riproduceva le caratteristiche fondamentali di quel processo.[6] Benché sia un modello piuttosto astratto (in effetti vale non solo per gli elettroni in un acceleratore di particelle, ma anche per molti altri fenomeni), con una delle sue tipiche immagini rivela come i frattali emergano dal caos (*figura 5*). In parole povere, le piccole «isole» dell'immagine, ossia i piccoli anelli deformati, corrispondono ad aree dell'acceleratore (della sua sezione trasversale, il che significa che se stessimo all'interno lo guarderemmo nel senso della lunghezza) in cui gli elettroni vivono felici. Gli elettroni che partissero da uno qualunque di questi punti potrebbero orbitare migliaia o milioni di volte senza mai lasciare gli stretti confini dell'isola. Sono, queste, le aree

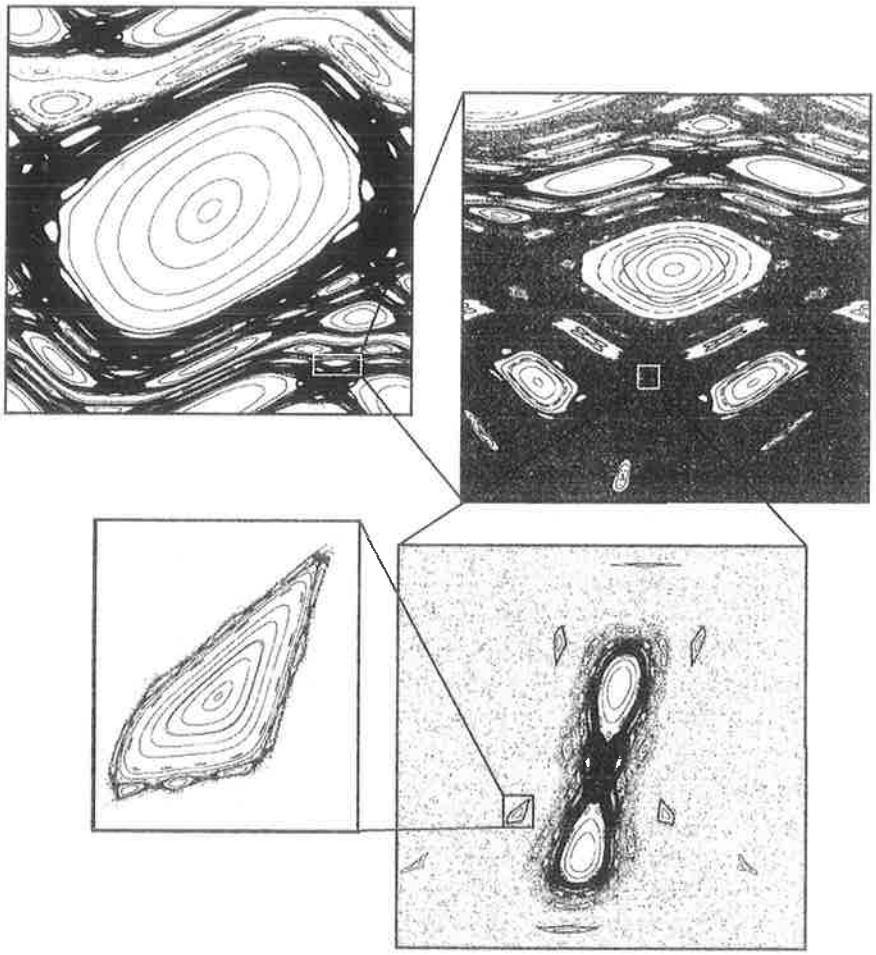


Figura 5. Nel modello di Čirikov e Taylor, si traccia un punto nero all'interno di un grande quadrato e si applica una regola semplice che spiega dove tracciare un altro punto in base all'ubicazione del primo. La regola definisce approssimativamente alcune caratteristiche dello spostamento (verso l'orlo) di un elettrone che orbita in un acceleratore di particelle. Se la si applica ripetute volte, si trovano risultati diversi secondo l'area da cui si è iniziato. Se si comincia da una delle aree ovali, i punti descriveranno all'incirca un cerchio, come pianeti che orbitassero con regolarità intorno al sole. Se si comincia invece da una qualsiasi posizione nell'area scura, i punti vagheranno in maniera caotica per tutti gli angoli bui. Tale movimento irregolare e «anarchico» è un esempio di caos, e una delle caratteristiche sorprendenti del modello è che le isole di regolarità si mischiano al mare di caos: se si ingrandisce un qualsiasi quadratino, si scoprono al suo interno regioni di entrambi i tipi. Su tutte le scale, il caos e la regolarità coesistono in una configurazione autosimilare. (Per gentile concessione di James Meiss, dell'università del Colorado a Boulder.)

in cui i fisici vorrebbero tenerli. Se però un elettrone finisse in qualche modo per sconfinare nell'ampia e indefinibile zona tra le isole di stabilità, sarebbero guai: là c'è infatti un mare di caos nel quale verrebbe trascinato fino a sbattere contro la parete e a schizzar fuori dell'acceleratore.

Ciò che rende affascinante l'immagine è l'incredibile complessità. Se ingrandiamo di mille volte una porzione qualsiasi del mare di caos, vi troveremo dentro altre isole. Se ingrandiamo la regione intorno a un'isola, vi rinverremo altre piccole isole satelliti e altre regioni di caos. Se ingrandiamo l'area intorno a un satellite, scopriremo ulteriori satelliti; e così via all'infinito. Caos e stabilità si mescolano in una configurazione frattale e la struttura si ripete su tutte le scale. Non c'è da stupirsi che non sia un'impresa facile mantenere le particelle in orbita anche solo per pochi secondi!

Dunque il caos produce frattali; e vi sono migliaia di altri esempi del genere. Siamo però ancora su un piano alquanto astratto e assai lontano dalle configurazioni frattali delle venature di una foglia o delle crepe di un blocco di fango lasciato seccare al sole. Tali strutture non hanno nulla a che vedere con il caos, sicché dev'esserci una seconda risposta alla domanda: qual è l'origine dei frattali?

La fisica storica

La seconda risposta, quella più rilevante per gli oggetti frattali diffusi in natura, è che derivino dai normali processi di crescita ed evoluzione. In qualche modo la storia pare svolgere un ruolo importante nel fenomeno, sicché la fisica necessaria a comprendere i frattali e le leggi della potenza è una fisica storica. In biblioteca, però, si cercherà invano una *Rivista di fisica storica* o qualunque altra pubblicazione del settore in cui appaia il termine «storia». I fisici, infatti, quando parlano dei fenomeni in cui la storia ha un ruolo importante usano un linguaggio tecnico. Per comprenderlo e per comprenderne la connessione con il concetto di storia, immaginiamo di mettere alcuni grani di sale in un bicchiere d'acqua calda e di mescolarli finché si sciolgano. Il significato della «storia» in fisica ci

risulterà chiaro appena tenteremo di riportare il sale allo stat solido.

Al microscopio, ciascun grano di sale è un cristallo compost da atomi di sodio e cloro legati in una perfetta struttura geome trica. A unirli è la forza del legame chimico, ma nel bicchier ciascun atomo viene pesantemente bombardato dalle molecol d'acqua. La maggiore o minore temperatura del liquido determinerà la velocità di movimento delle molecole: più in fretta s muovono, più forte bombarderanno e più probabilità avranno di rompere l'equilibrio degli atomi di sodio e cloro. Se l'acqua è sufficientemente calda, in poco tempo tutti gli atomi si staccheranno dai cristalli e di questi non resterà traccia. In altre parole, il sale si scioglierà e tutti gli atomi galleggeranno nel liquido isolati, circondati da ogni lato dall'acqua. Quello diventerà il nuovo equilibrio e, in assenza di cambiamenti nelle condizioni esterne, tutto resterà così per sempre. Nello stato di equilibrio il concetto di storia ha ben poca rilevanza.

Ora mettiamo il bicchiere in frigorifero a raffreddare. Se la temperatura scende sotto una certa soglia, il sale ricomincerà a formarsi. Gli atomi di sodio e cloro riprenderanno ad aggregarsi e le molecole d'acqua, che non si muovono più così in fretta, non riusciranno a separarli.[7] Se la temperatura viene mantenuta di poco sotto la soglia, il nuovo solido cristallizza, come dicono i fisici, «in equilibrio», anche se in realtà è solo molto vicino allo stato di equilibrio. Ciò significa che si forma molto lentamente e che diventa un cristallo perfetto, una forma euclidea regolare e mirabile come un diamante.

Il motivo del fenomeno è che le molecole d'acqua hanno quasi la forza di fermare la cristallizzazione, ma non la fermano del tutto. Se un atomo riesce ad aggregarsi, molto probabilmente dopo un attimo verrà di nuovo indotto a staccarsi e continuerà a galleggiare intorno alla superficie del cristallo. In seguito si riaggregherà, poi si staccherà di nuovo, finché troverà il punto giusto in cui adattarsi perfettamente al nucleo. Insomma tutti gli atomi si aggregano assumendo la posizione corretta e la storia in questo caso ha ben poca importanza: anche se si ripetesse l'esperimento un centinaio di volte, si avrebbe sempre lo stesso esatto risultato.

Che cos'accade se la temperatura è assai più fredda e molto al di sotto della soglia? Accade un fenomeno interessante. Il processo di cristallizzazione è più veloce e i grani si formano in stato di non equilibrio. Qualunque atomo si leghi momentaneamente al nucleo vi rimane attaccato, perché le molecole d'acqua non sono in grado di smuoverlo. È facile immaginare il risultato: una sorta di ingorgo stradale molecolare che induce nel solido una forma irregolare e complessa, con molte diramazioni e sottodiramazioni.

Per comprendere i tipi di struttura che si formano e perché si formino, i fisici hanno ideato un semplice modello matematico che chiarisce l'essenza del processo e che si potrebbe considerare l'archetipo della nuova fisica storica. Nonostante il nome terribile, «aggregazione limitata dalla diffusione», è in realtà elementare e funziona a meraviglia. Elaborato nel 1984 dai fisici Tom Witten e Leonard Saunders dell'università di Chicago, il modello dell'aggregazione è una versione puramente matematica della cristallizzazione descritta poc'anzi e ha un funzionamento così semplice che lo si può seguire passo passo in ogni particolare.

Al centro di uno spazio vuoto compare una singola particella. Da lontano si avvicina un'altra particella che segue una traiettoria casuale e del tutto accidentale. Se non sfiora la prima, continua a procedere per conto suo, se invece la tocca, le si aggrega. Compare poi una terza particella che segue a sua volta una direzione e una traiettoria casuali; anch'essa, se colpisce la prima (o una delle prime due, nel caso si siano aggregate) si aggrega, mentre se manca il bersaglio procede oltre. Il modello consiste semplicemente nel liberare particelle a caso, farle aggregare o non aggregare e vedere che cos'accade al grappolo. Potremmo per esempio immaginarcele come atomi di sodio e cloro e vedere nel grappolo il cristallo di sale che si sta formando.

Benché le regole del modello matematico siano molto semplici, l'aggregato che si costituisce in condizioni di non equilibrio ha una forma fantastica, assai diversa dalle forme semplici osservabili quando l'aggregazione avviene in stato di equilibrio (*figura 6*). Non è difficile capirne il motivo. Quando

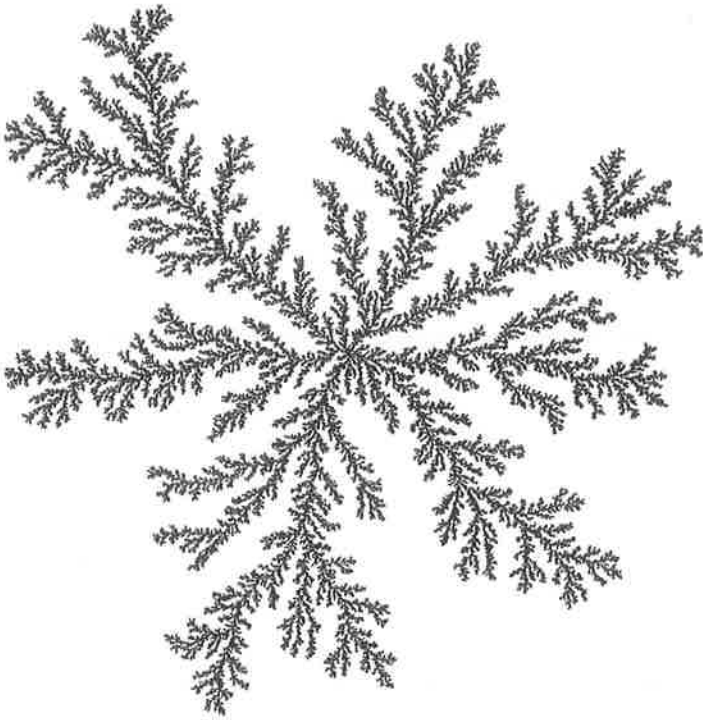


Figura 6. Nel modello di aggregazione di Witten e Saunders, le particelle arrivano a caso da lontano e, se incrociano il grappolo in crescita, vi si attaccano. A lungo andare, il risultato ricorda quest'immagine. Se si conduce la simulazione un milione di volte, non si trova mai la stessa identica struttura: nei dettagli specifici, il risultato è del tutto imprevedibile. Nonostante ciò, l'aspetto è sempre simile e l'aggregazione soddisfa precise leggi della potenza. (Per gentile concessione di Paul Meakin, dell'università di Oslo.)

una particella intercetta il grappolo, vi si attacca e questo è un avvenimento storico definitivo e irreversibile, che lascia traccia di sé in tutto quanto accade in seguito. L'aggregazione della particella altera la forma del grappolo e rende più probabile che si aggreghino lì accanto altre particelle; e quando queste in effetti si aggregano, rendono ancora più probabile che altre le imitino. La crescita è assai instabile e dipende da ogni minimo evento. Nello stato di non equilibrio vi è un fenomeno come la storia; ed è un fenomeno di estrema importanza.

Aggregazioni irreversibili

Una volta Francis Crick, lo scopritore con James Watson della struttura del Dna, disse che generare «accidenti cristallizzati» era l'essenza del processo evolutivo. Le mutazioni genetiche casuali inducono quasi sempre una perdita di fitness, cioè della capacità di sopravvivere e riprodursi, sicché in genere un ceppo mutante finisce per estinguersi. Ma le rare mutazioni accidentali che portano a un aumento della fitness possono attecchire e diffondersi nelle popolazioni. Quando ciò accade, l'accidente «si cristallizza» e tutta la successiva evoluzione della specie in questione deve per forza avvenire da un nuovo «trampolino». L'evoluzione è cumulativa e ogni accidente cristallizzato va ad aggiungersi alla serie di accidenti cristallizzati del passato, sicché attraverso il tempo si costruisce una lunga, tortuosa via che va verso il futuro ma che ha solide radici nella storia; e gli accidenti cristallizzati sono una vera e propria incarnazione della contingenza storica.

Essi sono anche il fulcro del modello di aggregazione. Come abbiamo visto descrivendo la formazione del cristallo, appena la regola dell'aggregazione di particelle diventa irreversibile, la storia appare sulla scena assieme a una contingenza estrema. Il più banale degli accidenti lascia la propria traccia indelebile nella struttura in progressiva crescita. Così, se si procede alla simulazione per due o anche cento volte, non si ottiene mai lo stesso esatto risultato. Tuttavia le complesse strutture che si formano hanno delle caratteristiche costanti. Per esempio, quante particelle si trovano a una distanza R dal centro? La risposta è la stessa per tutti i grappoli e segue la legge della potenza: al raddoppiare di R, il numero di particelle aumenta di 3,25.

Vediamo anche in questo caso che la regolarità ingannevolmente semplice della legge della potenza ha in realtà implicazioni profonde. Significa che il grappolo è frattale e che non c'è una dimensione tipica per le varie parti o sottograppoli. Anzi, se si prende una porzione dell'immagine e la si ingrandisce, si noterà che è molto simile a quella intera. Si osserva inoltre un particolare rilevante: i grappoli hanno *sempre* quella

proprietà. Anche in mezzo alla tempesta di meri accidenti in cui ha luogo l'aggregazione e anche se gli eventi seguono l'una o l'altra direzione per puro caso, si riscontrano proprietà prevedibili. Dietro gli accidenti c'è un processo regolare che equivale a una legge e che, anziché manifestarsi nella forma esatta, si manifesta nella forma statistica del grappolo.

Abbiamo appena descritto un processo storico di non equilibrio che conduce spontaneamente ai frattali e all'invarianza di scala. L'esempio del modello di aggregazione mostra come la fisica possa fronteggiare anche la storia e le sue inevitabili contingenze. Una delle lezioni che i fisici hanno ormai appreso è che non si comprendono la cristallizzazione e altri processi storici attraverso le equazioni classiche indipendenti dal fattore storico. Se stiamo studiando un fenomeno che può essere compreso solo seguendone l'esatta evoluzione particella per particella, quelle equazioni non saranno quasi mai in grado di descriverlo. Nella fisica del non equilibrio, la fisica storica, bisogna utilizzare modelli matematici come quello dell'aggregazione.

Certo, il modello di Witten e Saunders è solo uno dei tanti: se si cambiano le regole, cambiano anche la configurazione e l'evoluzione storiche. E mentre l'aggregazione limitata dalla diffusione coglie l'essenza della cristallizzazione, altri modelli colgono quella di altri processi storici del mondo reale. Tenendo presente questa rosa di possibilità, torniamo ora ai terremoti.

Paradossalmente Socrate, come filosofo, conseguì il massimo risultato speculativo quando riconobbe che l'unica cosa che sapeva era di non sapere. Come abbiamo visto nel III capitolo, anche i sismologi avrebbero ogni motivo di ammettere la loro ignoranza, se non fosse per l'unica cosa che conoscono con certezza: la legge di Gutenberg-Richter. Quest'importante legge della potenza relativa alla statistica dei terremoti è una sorta di cartello indicatore matematico che enuclea il processo fisico – e storico – alla base dei sismi. Gli studi successivi ne hanno dato ulteriore conferma.

V
L'ubiquità dello stato critico

Le scienze non cercano di spiegare, non cercano nemmeno di interpretare: si limitano a costruire modelli.

John von Neumann[1]

«Ogni verità è semplice.» Non è questa una doppia menzogna?

Friedrich Nietzsche[2]

La verità sulla faglia di San Andreas non è semplice. È un po' come la verità sull'assassinio di John F. Kennedy, il coinvolgimento degli Stati Uniti nella guerra del Vietnam, o l'attuale quadro politico russo: un problema spinoso, che più si studia più si rivela complicato. Come abbiamo visto, la faglia di San Andreas è una linea di frattura che attraversa la California da nord a sud; ma su entrambi i suoi lati, vicino alla frattura principale, vi sono migliaia di faglie più piccole da ognuna delle quali originano sottofaglie ancora più piccole. Il termine «faglia» andrebbe in realtà sostituito con l'espressione «sistema di faglie». Né la frattura si arresta quando la San Andreas termina vicino a Los Angeles; le si sostituiscono a quel punto i sistemi di faglie di Benning e San Jacinto, che, più a sud, tagliano lo stato a fette. La California è una ragnatela di crepe che ricorda l'asfalto di una vecchia strada in rovina.

Tutte le zone sismiche della terra presentano le stesse fratture, ma vi è sempre una certa differenza nei particolari. In Cina, Colombia, California o Giappone faglie, sottofaglie e sotto-sottofaglie formano la loro peculiare rete: non ce ne sono due che siano identiche. Non c'è dunque da stupirsi se non si pos-

sono prevedere i terremoti. Alcune fratture interessano terreni montuosi, altre pianure e colline, altre ancora la crosta del fondo oceanico. Quanto è profonda una faglia? Anche qui la risposta varia: alcune sono profonde trenta chilometri, altre solo cinque.

Benché i terremoti si verifichino in un migliaio di ambienti diversi, l'esito ultimo di una simile complessità è la bruta semplicità della legge di Gutenberg-Richter. Negli anni Ottanta, quando si trovarono ad affrontare il problema del caos, i fisici si chiesero come fosse possibile che fenomeni elementari come un pendolo in regolare oscillazione periodica celassero in realtà un comportamento assai irregolare e caotico. Qui invece dobbiamo risolvere un problema praticamente opposto: chiarire come mai tutti i complessi fenomeni di frattura della crosta terrestre conducano a una legge di incredibile semplicità. Come mai l'enorme varietà delle componenti non è di ostacolo?

Sabbie e sismi

Nell'immaginazione popolare, a compiere le grandi scoperte è sempre un genio solitario che, lavorando in un'oscura stanzetta, contro ogni probabilità trae dall'atmosfera rarefatta del pensiero puro una nuova idea rivoluzionaria. Narra per esempio la leggenda che Albert Einstein, stufo dei suoi insegnanti, accettò un impiego all'Ufficio brevetti di Berna e con carta e matita rivoluzionò la fisica da solo. Più sovente, però, le grandi idee hanno un'origine meno poetica: come disse Albert Camus, «nascono spesso alla svolta di una strada e alla bussola di una trattoria»;[3] oppure, nel contesto dell'odierna scienza professionale, dallo scambio fecondo tra ricercatori di diverse discipline.

Una mattina d'estate del 1988 si stava tenendo una conferenza sui frattali in un piccolo college del New Hampshire. A parlare era il geofisico Yakov Kagan e l'argomento – i terremoti – non era certo speciale. Poiché la maggior parte degli scienziati seduti ad ascoltarlo non era costituita da geofisici, Kagan fornì un quadro di insieme, poi espose in termini

semplici la singolare ed elegante legge di Gutenberg-Richter. Ammise con tristezza che, nonostante ogni sforzo, lui e i suoi colleghi continuavano a registrare regolari insuccessi nella previsione dei sismi e sottolineò un altro particolare curioso: anche le faglie di qualsiasi sistema di faglie avevano carattere frattale. In altre parole, segmenti di faglia di lunghezza diversa presentano la significativa regolarità della legge della potenza. Ogni volta che si divide a metà un segmento, si scopre che i segmenti dimezzati diventano sette volte più frequenti.[4] Insomma le faglie brevi sono molto più numerose delle faglie lunghe: la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza di un fattore costante e non esiste lunghezza tipica.

Si dà il caso che Per Bak fosse seduto tra il pubblico e che, con il procedere della conferenza, si ricordasse dei mucchietti di sabbia e si sentisse sempre più interessato al discorso. Ricorderete che nel modello Bak-Tang-Weisenfeld alcune valanghe sono costituite da un unico granello e altre da milioni, ma che le une e le altre si formano per lo stesso identico motivo. Tutto inizia quando un singolo granello cade in qualche punto del mucchio: se rende il monticello troppo ripido, rotola giù dal pendio e non succede altro. Ma, come avevano scoperto Bak, Tang e Weisenfeld, quando il mucchio raggiunge lo stato critico i granelli sul punto di rotolare giù sono molti, e interconnessi in «dita di instabilità» delle lunghezze più disparate. Mentre alcune «dita» sono brevi, altre attraversano l'intero mucchio e in questi casi la reazione a catena innescata da un singolo granello può provocare una gigantesca valanga. Sotto il profilo matematico, tale caratteristica produce una perfetta legge della potenza per le valanghe. Se si analizza la frequenza delle varie valanghe, si scopre che, siano esse costituite da alcune decine o da alcuni milioni di granelli, seguono tutte la stessa legge: al raddoppiare del numero dei granelli, diventano circa 2,14 volte meno frequenti.

Bak cominciò a chiedersi se un fenomeno del genere non interessasse anche la crosta terrestre. L'ipotesi era suggestiva, ma, almeno all'apparenza, assurda: come poteva un modello matematico concernente mucchietti di sabbia dire qualcosa di

importante su sconvolgimenti capaci di creare nuovi laghi e devastare intere città?

Anche se non era affatto evidente che il modello del mucchietto di sabbia fosse connesso con il funzionamento della crosta terrestre, al Brookhaven National Laboratory, Bak e Chao Tang si misero al lavoro, parlando con geofisici teorici e spulciando la letteratura del settore; e presto trovarono un modello che era stato elaborato qualche anno prima dai sismologi, ma che purtroppo non ricordava molto quello della sabbia.

Nel 1967 R. Burridge e Leon Knopoff, dell'università della California a Los Angeles, avevano cercato di semplificare la sconcertante complessità della fisica dei sismi nella speranza di capire meglio la causa delle perturbazioni.[5] Benché i terremoti si sviluppino in immensi sistemi di faglie e sottofaglie e lo slittamento interessi sovente molte faglie alla volta, i due ricercatori non avevano tenuto conto di quel dato e si erano concentrati su una singola frattura. Ricordiamoci che, lungo la faglia principale di San Andreas, il blocco occidentale si sposta verso nord, mentre quello orientale si dirige a sud. Se non scorrono lungo la frattura, le rocce s'incurvano e accumulano tensione interna. Più grande è la tensione, più probabile è lo slittamento. I sismi sono causati dall'accumulo e dalla liberazione della tensione. Burridge e Knopoff avevano cercato di rappresentare schematicamente il fenomeno.

Resistenza e slittamento

Immaginiamo un ampio pavimento di legno e un soffitto altrettanto ampio che si muove inesorabilmente come un nastro trasportatore verso destra (*figura 7*). Fissate al soffitto vi sono alcune aste flessibili collegate a diversi blocchetti di legno sul pavimento. Il modello funziona così: quando il soffitto si muove le aste si piegano, cercando di trascinare con sé i blocchetti. L'attrito con il pavimento tiene i blocchi fermi, ma più il soffitto si muove, più le aste si piegano, sicché viene il momento in cui la resistenza per attrito è vinta e i blocchi di colpo scivolano avanti.

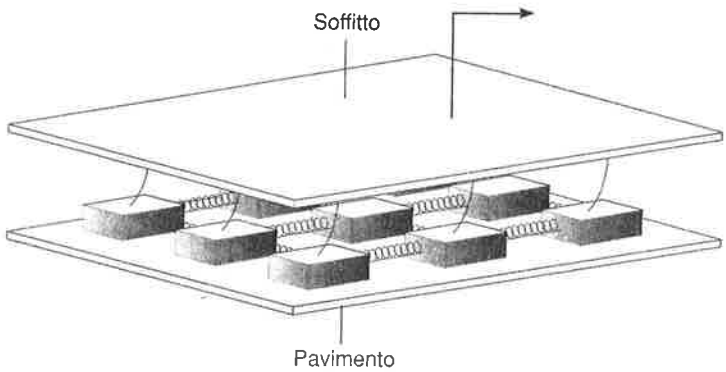


Figura 7. Il modello Burridge-Knopoff dei terremoti. (Adattamento di un'immagine tratta da Z. Olami, H.J. Feder e K. Christensen. *Self-organized criticality in a continuous, non-conservative cellular automaton modelling earthquakes*, «Phisical Review Letters», 1992, 68, pp. 1244-47. Riproduzione autorizzata.)

C'è un altro elemento che rende il modello interessante: i blocchi sono collegati da molle. Se non avessero questo vincolo, si muoverebbero indipendentemente l'uno dall'altro: starebbero fermi, scivolerebbero, starebbero di nuovo fermi e di nuovo scivolerebbero, ma per conto loro. Poiché invece vi sono le molle, ciascun blocco, quando scivola avanti, spinge quello che ha di fronte e trascina quello che ha di dietro; inoltre, se per qualsiasi motivo si sposta di lato, spinge e tira i blocchi ai suoi fianchi. Insomma ciascun blocco è sottoposto a forze provenienti sia dalle aste flessibili fissate al soffitto sia dalle molle che gli stanno davanti, dietro e ai lati; e queste rendono interdipendente il moto dei vari blocchi.

Che cosa c'entra tutto ciò con i terremoti? È molto semplice: il modello riproduce una faglia geologica virtuale, ridotta alla sua fisica essenziale. Il pavimento e il soffitto rappresentano due placche continentali, e lo spazio tra i blocchi e il pavimento rappresenta le due immense superfici di quelle placche. Che cosa sono, allora, le molle tra i blocchi? Le rocce, com'è noto, sono dure. Voi e io non possiamo comprimere una lastra di granito con le mani, come fosse una molla, ma due continenti che si muovono insieme non hanno problemi a farlo. Supponiamo ci sia un terremoto. Se le rocce in punti diversi della faglia scivolano in misura disuguale, alcune regioni roc-

ciose saranno compresse e cercheranno, una volta cessata la forza perturbatrice, di riprendere le loro dimensioni. Le molle rappresentano, sempre schematicamente, il fatto che le rocce sono elastiche.

La simulazione consiste nel far spostare il soffitto e nello studiare le conseguenze del movimento. Che cos'accade, dunque? Burridge e Knopoff avevano elaborato un modello puramente fisico, utilizzando una serie unidimensionale anziché una rete bidimensionale di blocchi. Purtroppo, nel 1967, erano riusciti a condurre la simulazione solo in maniera rudimentale, con un ristretto numero di blocchi e un ristretto numero di slittamenti. Nel 1988, invece, Bak e Tang, usando un comune computer da tavolo, trovarono qualcosa che i due ricercatori californiani, con i loro limitati mezzi tecnici, non si sarebbero neppure sognati di scoprire.

Per simulare il modello al computer è necessario conoscere un ulteriore dato. Ciascun blocco dovrebbe scivolare quando le forze che lo spingono superano una certa soglia. Ma quando comincia a scivolare, che cos'accade? L'entità dello slittamento dipende dalla quantità di attrito tra blocco e pavimento, cioè tra due superfici rocciose che scorrono l'una accanto all'altra. Maggiore è l'attrito, minore è lo slittamento; minore è l'attrito, maggiore è lo slittamento. Purtroppo, però, le quantità del caso restano ignote. Decisi ad andare avanti, Bak e Tang risolsero il problema nella maniera più sbrigativa: ignorandolo.

In teoria il movimento dei blocchi dovrebbe essere descritto dalle equazioni del moto di Newton, ma per ridurre il modello all'osso i due fisici le sostituirono con poche, semplici regole. Supponiamo che a un certo punto i blocchi si trovino in una determinata configurazione: che cos'accade un attimo dopo? Naturalmente non accade nulla ai blocchi su cui si esercita una forza troppo debole per produrre slittamento; l'attrito li mantiene fermi. Gli altri si muovono e, per spiegare come, Bak e Tang formularono la seguente regola *ad hoc*: se la forza che agisce su un blocco supera la soglia dello slittamento, il blocco scivola avanti di un passo, la forza esercitata su di esso diminuisce di un'unità, mentre quella esercitata su ciascuno dei

suoi quattro vicini aumenta di un quarto di unità. In altre parole, quando un blocco scivola, parte della forza cui è sottoposto viene trasferita e divisa equamente tra i suoi vicini. La regola non rispecchia fedelmente le leggi di Newton, ma poiché, muovendosi, un blocco induce una riduzione della forza cui è sottoposto e un aumento di quella cui sono sottoposti i suoi vicini, se non altro è corretta.

Déjà vu

Uno dei grandi vantaggi della regola era che si potevano condurre rapide simulazioni con milioni di blocchi. Paradossalmente, però, Bak e Tang non le condussero, perché ancor prima di cominciare ebbero un'improvvisa sensazione di *déjà vu*. Avevano già visto tutto. Senza volere, la regola *ad hoc* aveva conferito al modello del terremoto un andamento matematico identico a quello del mucchietto di sabbia. In una simulazione vi erano blocchi che scivolavano su una superficie, nell'altra granelli di sabbia che rotolavano giù da un pendio, ma dietro le due diverse situazioni c'era la stessa logica matematica. Per Bak e Chao Tang non ebbero bisogno di fare esperimenti con il nuovo modello per capire come avrebbe funzionato: era chiaro che, di là dall'apparenza differente, si trattava del vecchio gioco dei mucchietti.

A quel punto si posero una domanda fondamentale: sapevano che le valanghe del modello della sabbia seguivano una legge della potenza e si chiesero se lo stesso valesse anche per i terremoti o, almeno, per i terremoti del genere «blocco e molla». La legge di Gutenberg-Richter riguarda il numero di sismi che liberano una certa quantità di energia. Era abbastanza facile vederne la traduzione nel modello dei blocchi. Bak e Tang calcolarono che ciascun blocco, scivolando di un passo, doveva liberare la stessa quantità di energia, per cui l'intensità totale del sisma simulato era in pratica il numero complessivo di slittamenti dei blocchi prodotto dall'evento iniziale. Se si confrontano i due modelli, si vede che altrettanto accade nel caso dei mucchietti di sabbia, dove il granello iniziale provoca una catena di eventi la cui somma è la dimensione della va-

langa. Insomma i terremoti del modello dei blocchi seguono la stessa legge della potenza relativa alle valanghe del modello della sabbia. Particolare di notevole importanza, alla fine emerge una legge assai simile a quella di Gutenberg-Richter relativa ai sismi veri.[6]

Stupiti ed entusiasti, Bak e Tang constatarono che il loro modello elementare sembrava spiegare la legge più importante di tutta la geofisica. Si poteva però sollevare una piccola obiezione: nel modello del mucchietto di sabbia, al raddoppiare della dimensione la valanga diventa 2,14 volte più rara, mentre nella legge di Gutenberg-Richter al raddoppiare dell'energia liberata il sisma diventa quattro volte più raro. Dunque nelle due leggi le cifre non erano le stesse. Quella piccola discrepanza, però, appariva insignificante in confronto ai risultati ottenuti grazie alla simulazione dei blocchi: Bak e Tang erano se non altro riusciti a spiegare da dove derivasse la qualità assolutamente speciale della legge della potenza.[7]

Analizzando il diagramma del numero di blocchi che scivolavano in ciascun momento durante una simulazione, i due ricercatori rilevarono un andamento bizzarro e tuttavia stranamente familiare: come il diagramma dell'attività sismica in qualsiasi zona sismica, appariva irregolare e apparentemente casuale, con i macrosismi che spiccavano come sequoie nel deserto; se un terremoto di lieve entità comportava lo slittamento di un solo blocco, uno di grande entità poteva comportare lo slittamento di milioni.

Chi crede che eventi speciali abbiano origini speciali penserà che lo slittamento di milioni di blocchi sia provocato da qualcosa d'insolito (come i geofisici credono che siano provocati da qualcosa d'insolito i terremoti catastrofici). Invece la causa iniziale di ogni evento, grande o piccolo che sia, è solo l'improvviso slittamento di un blocco da qualche parte del sistema. Poiché i blocchi e le molle si organizzano nello stato critico, il sistema è in equilibrio instabile e può accadere di tutto. Lo slittamento di un blocco a volte scatena una valanga di slittamenti che interessa l'intero sistema e si traduce in un terremoto catastrofico. La differenza tra il macrosisma e il microsisma dipende solo dall'esatta ubicazione del primo slitta-

mento. Ecco perché i terremoti sono imprevedibili e perché catastrofi spaventose possono colpire senza preavviso.

I risultati di Bak e Tang parevano troppo belli per essere veri, e infatti troppo belli risultarono davvero. Altri ricercatori demolirono quel modello così semplificato e la regola *ad hoc* si guadagnò ferocissime critiche. Il mucchietto di sabbia ha la proprietà di essere «conservativo», il che significa che quando i granelli rotolano giù, il loro numero totale si conserva: non scompaiono mai. Nel loro modello dei sismi, Bak e Tang attribuirono la stessa qualità conservativa alla forza che agiva sui blocchi. Quando questa faceva scivolare un certo blocco, la regola *ad hoc* la distribuiva in egual misura tra i blocchi vicini, sicché la forza totale restava la stessa, come restava lo stesso il numero totale dei granelli nella simulazione dei mucchietti di sabbia. Ecco perché i due modelli finivano per essere uguali.

Purtroppo nulla, nella fisica di una faglia, lascia pensare che quella proprietà speciale valga per il mondo reale. I geofisici non sanno che cosa regoli l'attrito tra i labbri di una frattura, ma sanno quanto meno che l'attrito c'è e che dovrebbe consumare parte della forza esercitata sui blocchi, per cui la regola di Bak e Tang non è quasi sicuramente valida in natura. Per mettere a tacere chi aveva mosso quell'obiezione, i due ricercatori modificarono la regola in maniera da adattarla maggiormente alla realtà, ma, quando lo fecero, il modello si trasformò in qualcos'altro: non equivaleva più alla simulazione del mucchietto di sabbia e la legge della potenza si dissolse nel nulla. I terremoti parevano dunque restare, almeno per il momento, inspiegati.

Un errore proficuo

Nel 1990 Per Bak e il suo collega Kan Chen scrissero un lungo articolo sui terremoti e la criticità autorganizzata e ne inviarono la bozza ad altri fisici, tra cui Jens Feder a Oslo, in Norvegia. Assieme al figlio Hans Jacob, che all'epoca frequentava ancora il liceo, Feder condusse alcune simulazioni al computer per cercare di riprodurre i risultati di Bak e colleghi. Padre e figlio misero a punto un programma che seguiva le re-

gole descritte nell'articolo e iniziarono le loro ricerche. Registrarono la frequenza di sismi di varie dimensioni, poi, dopo aver acquisito dati sufficienti, elaborarono il diagramma. Come previsto, trovarono una legge della potenza; ma il punto seccante era che non appariva la stessa individuata da Bak e colleghi: le cifre erano diverse.

Controllarono il codice macchina e riesaminarono la descrizione di Bak e Chen, però tutto risultava corretto. Condussero altre simulazioni, ma la legge continuava a essere diversa. Frustrato, Jens alla fine telefonò a Bak e dopo un lungo colloquio comprese la causa del problema: la prima stesura dell'articolo conteneva un piccolo, ma cruciale refuso. Una delle regole era stata trascritta in maniera scorretta: i Feder ne avevano inserito una errata nel modello, che di fatto era divenuto un'altra cosa, anche se, miracolosamente, funzionava ed era coerente. Se a volte grandi idee nascono «alla svolta di una strada», importanti scoperte possono essere fatte grazie a un errore tipografico; infatti il nuovo modello continuava a generare una regolarità molto simile alla legge di Gutenberg-Richter, ma non accusava il problema delle forze conservative.

L'estate successiva Hans Jacob Feder cominciò a collaborare con Zeev Olami e Kim Christensen, colleghi di Bak a Brookhaven, per cercare di capire il motivo per cui il modello funzionava. Tenendo presente la simulazione originaria di Burridge e Knopoff, i tre ripercorsero i passi di Bak e Tang. Semplificarono al massimo il modello, cercando di conservare la fisica di base, e presto arrivarono al punto difficile: come descrivere il movimento di un blocco dopo che questo aveva cominciato a scivolare. Mentre Bak e Tang a un certo punto avevano introdotto la problematica regola *ad hoc*, loro provarono ad aggirare l'ostacolo in un modo che aveva solide radici fisiche.

Quando due rocce scivolano l'una contro l'altra, viene prodotto calore; in altre parole, una parte dell'energia elastica che è stata accumulata viene spesa non nel movimento, ma nel calore. Per riprodurre il fenomeno reale, il modello doveva includere un analogo meccanismo di dissipazione dell'energia. I tre ricercatori non ebbero difficoltà a idearlo: inserirono la regola che se un blocco scivolava avanti, dissipava parte dell'e-

nergia a causa dell'attrito con il pavimento. Perciò, se le forze che agivano sul blocco in movimento fossero diminuite di un'unità, le forze che agivano sui blocchi vicini sarebbero dovute aumentare di meno di un'unità. Bastò quello. Quando la nuova regola rimpiazzò quella vecchia del modello Bak-Chen, il modello Olami-Feder-Christensen, nato praticamente per caso, decollò in pieno.[8]

La simulazione ha altre caratteristiche notevoli. Naturalmente non cerca di riprodurre in maniera fedele l'origine dei sismi, ma mira semmai a descrivere il fondamentale meccanismo matematico che conferisce al processo il suo carattere peculiare. Certo, nel caso che minime modifiche delle regole del gioco avessero condotto a risultati completamente diversi, il modello non sarebbe risultato per nulla convincente e ci si sarebbe dovuti chiedere se non fosse interamente «viziato». Ma quando i tre ricercatori corressero il dato sulla quantità di energia persa in ciascuno slittamento, il risultato non cambiò. Se si aumentava l'energia dissipata del 10, del 20 e infine del 30 per cento, la legge della potenza rimaneva immutata. In altre parole, il modello risulta totalmente insensibile alle modifiche apportate alle regole. Quasi tutte le simulazioni che hanno questo stesso nucleo logico generano la legge di Gutenberg-Richter. Inoltre il modello Olami-Feder-Christensen riflette gli eventi sismici ancor più fedelmente di quello di Bak e Tang, perché al raddoppiare dell'intensità il sisma diventa quattro volte più raro, proprio come accade nella legge di Gutenberg-Richter relativa ai terremoti veri.

Ma c'è dell'altro. Nel 1995 il fisico Keisuke Ito dell'università di Kobe, in Giappone, condusse numerose simulazioni con una variante del modello, analizzando i momenti precisi in cui i terremoti colpivano.[9] In genere, nel mondo reale, i sismi sono preceduti da prescosse e seguiti da scosse secondarie. È un altro modo di esprimere un concetto fondamentale: i terremoti tendono a raggrupparsi nel tempo e più lungo è l'intervallo che passa tra l'uno e l'altro, più lungo sarà in futuro. La nozione è tutt'altro che intuitiva, e tuttavia emerge in maniera molto naturale dal modello.

La firma matematica di questo raggruppamento consiste

nella distribuzione dei «tempi di attesa»: in altre parole, quando si verifica un macrosisma la distribuzione dei tempi d'attesa di quello successivo segue a sua volta una legge della potenza. Nel modello Olami-Feder-Christensen, se per mille terremoti si calcola il tempo di attesa del terremoto seguente, si scopre che sono più numerosi i tempi brevi dei lunghi, come previsto dalla legge della potenza: per esempio tempi di attesa di due settimane risultano 2,8 volte più rari dei tempi di attesa di una sola settimana, e lo stesso vale per due mesi rispetto a un mese, due anni rispetto a un anno e così via. Se confrontiamo tale distribuzione con quella dei sismi reali, regolata dalla legge di Omori, vediamo che il numero critico per i tempi d'attesa non è 2,8, ma un assai simile 2,6.

Come può essere?

Negli ultimi anni, grazie al lavoro di Bak, Tang, Olami, Feder e Christensen e di molti altri ricercatori che non ho menzionato, si è riusciti a comprendere finalmente i terremoti o, forse, sarebbe più esatto dire che il processo alla loro base non è più un mistero assoluto. Una volta il fisico americano Richard Feynman consigliò ai giovani alle prese con la teoria quantistica di non porsi la domanda: «Come può essere?», che avrebbe precipitato la loro mente nell'abisso. Gli eventi nel mondo dei quanti non sono tenuti a comportarsi ragionevolmente, in accordo con i nostri preconcetti classici. Nel caso dei terremoti abbiamo una capacità di previsione forse addirittura inferiore a quella di cui disponiamo di fronte all'universo quantistico, ma finalmente possiamo rispondere alla domanda: «Come può essere?».

Capire, però, non è lo stesso che prevedere; anzi, qui ci induce a concludere che la previsione dei singoli terremoti è probabilmente impossibile, benché il quadro dei fenomeni sismici cui sono pervenuti gli scienziati sia molto semplice. La crosta terrestre è sottoposta a continua tensione a causa del movimento delle placche, che sono indotte a spostarsi dal calore dell'interno della terra. La tensione si accumula finché, lungo un breve segmento di faglia, la roccia raggiunge la so-

glia dello slittamento e slitta. Il segmento iniziale può essere lungo un solo millimetro o anche meno, ma quel che accade dopo non sempre è di così lieve entità, perché l'energia liberata alla fine non ha alcun rapporto con quella liberata all'inizio.

Se la crosta terrestre funziona come il modello del terremoto o come quello affine del mucchietto di sabbia, nel corso del tempo la tensione che si esercita sui vari blocchi rocciosi si autorganizza nello stato critico, e la crosta è percorsa da dita di instabilità delle più disparate lunghezze. Così, se un primo, breve segmento di roccia scivola da qualche parte, può accadere di tutto: il sisma può fermarsi lì, oppure lo slittamento iniziale può indurre i segmenti vicini a scivolare a loro volta. Le dimensioni finali del terremoto dipendono da un dettaglio infinitesimo che forse non saremo mai in grado di conoscere: la lunghezza dello specifico dito di instabilità interessato dal primo, lieve slittamento.

È dunque chiaro che i macrosismi non accadono per alcun motivo speciale. Si capisce che sono dovuti al fatto che la crosta terrestre si autorganizza nella criticità ed è sempre sull'orlo di uno sconvolgimento, ma non si capisce (ci si può solo limitare a descrivere *post factum* quali rocce siano scivolate e in quale sequenza) perché assumano proporzioni gigantesche come quelle del terremoto di New Madrid del 1811. La prima roccia che scivolò a New Madrid si trovava evidentemente su un lunghissimo dito. Questa rete di instabilità percorre tutti i sistemi di faglie e un grave sisma potrebbe avvenire in qualsiasi momento in qualsiasi faglia. Come ha osservato efficacemente Christopher Scholz, sismologo della Columbia University, un terremoto quando comincia «non sa quanto diventerà grande». E se non lo sa il terremoto, difficilmente lo sapremo noi.

Si potrà pensare che, elaborando un quadro preciso della tensione esercitata sulla crosta, studiando le proprietà di tutte le rocce e calcolando quanta tensione possano sostenere prima di scivolare, sia possibile costruire una mappa delle ramificazioni instabili. Ma nemmeno in quel caso si giungerebbe alla previsione dei macrosismi. Vi sono centinaia di milioni di aree nella crosta dove le rocce hanno superato i limiti della resi-

stenza e stanno per prodursi minimi, microscopici slittamenti. Occorrerebbe monitorare tutte quelle aree per accertarsi che nessuno slittamento interessasse una delle lunghe dita di instabilità.

Criticità ubiqua

In realtà, il mio saggio riguarda non i terremoti ma i modelli di cambiamento e di organizzazione ubiqui che interessano il nostro mondo a tutti i livelli. Ho iniziato dai sismi e ne ho parlato abbastanza estesamente solo per illustrare un'interpretazione dei fenomeni che presto incontreremo in altri contesti. È chiaro che tutti vorremmo individuare le cause dei terremoti, dei disastrosi crolli in Borsa, delle rivoluzioni e delle guerre mondiali per poterle evitare in futuro. Vedremo come i frattali e la legge della potenza siano all'opera in quei fenomeni, forse perché alla base della loro dinamica vi è la criticità. È probabile quindi che la speranza umana di trovare una spiegazione sia inutile e condannata a naufragare. Se il nostro pianeta è strutturato in maniera da trovarsi sempre sull'orlo di cambiamenti improvvisi e radicali, forse gli sconvolgimenti sono assolutamente inevitabili e non si possono prevedere nemmeno un attimo prima che accadano.

Immagino però che abbiate maturato una fondamentale obiezione a tutto quanto ho detto finora e che vi stiate chiedendo: per qual motivo una stupida simulazione al computer dovrebbe spiegare il reale funzionamento della crosta terrestre? In effetti la relazione con cui Bak e Tang descrissero per la prima volta il loro modello suscitò una valanga di critiche. Nel tentativo di capire i terremoti, molti geofisici hanno passato l'intera vita professionale a studiare zone sismiche e sistemi di faglie specifici. A loro quello sbrigativo approccio teorico parve quasi un insulto e servì solo a confermarli nell'idea che quanto Francis Crick aveva detto dei matematici valesse anche per i fisici teorici: «La mia esperienza mi dice che la maggior parte dei matematici sono intellettualmente pigri e, soprattutto, hanno una grande avversione a leggere articoli sperimentali».[10] Come osavano, quei quattro gatti di fisici teo-

rici che non avevano mai dato nemmeno un esame di geologia, sostenere di poter spiegare i terremoti con un gioco al computer nel quale non erano presi in considerazione i complessi dati dell'ambiente fisico teatro dei sismi veri?

Il modello di Burridge e Knopoff, per esempio, era una smaccata ipersemplificazione del problema reale. Escludeva quasi tutti i dati riguardanti la geometria e le proprietà fisiche delle faglie reali. Benché i sismi avvengano nelle rocce vere, il modello non includeva le caratteristiche delle rocce; si degnava solo di tener conto dell'elasticità, rappresentata dalle molle. Inoltre, come abbiamo visto, solo di rado i terremoti interessano una sola faglia: in genere agiscono su sistemi di faglie assai complessi, comprendenti molte faglie e sottofaglie, sicché non si può dire che, come accade nella simulazione al computer, il sisma si verifichi in una sola linea di frattura. La versione molto semplificata di Bak e Tang era ancor peggiore, perché, nel seguire gli spostamenti delle rocce, violava esplicitamente le leggi della fisica, ossia gli inevitabili effetti dell'attrito. Il modello Olami-Feder-Christensen rimediava in parte a quei gravi difetti, ma non si atteneva fedelmente alla fisica reale. Com'era possibile che la voluta falsificazione della realtà consentisse di comprendere i terremoti veri? I vari modelli matematici potevano anche essere ingegnosi, conclusero i geofisici abituati a lavorare sul campo, ma restavano nient'altro che giochi. E il curioso fatto che concordassero con la legge di Gutenberg-Richter era solo una coincidenza insignificante e del tutto priva d'interesse.

Alcuni sismologi pongono ancora oggi simili obiezioni. Hanno ragione? Per appurarlo, potremmo analizzare più a fondo terremoti specifici e cercare di scoprire quali fattori siano realmente importanti e quali no. Ma gli elementi da considerare sono pressoché infiniti e, fortunatamente, c'è un altro sistema per rispondere alle accuse di chi ritiene grave trascurare fattori reali nelle simulazioni al computer. Da quanto ho detto finora si sarà forse ricavata l'impressione che lo stato critico, dal quale deriva l'incredibile comportamento dei mucchietti di sabbia e dei terremoti simulati, sia stato scoperto da Bak, Tang e Weisenfeld nel 1987, ma non è così. I tre fisici indi-

viduarono la criticità nel loro modello e trassero delle conclusioni dalla scoperta, ma la scienza dello stato critico ha radici assai antiche.

Sono radici che risalgono a molti secoli fa, alla fisica di fenomeni elementari come il funzionamento delle calamite di ferro e il comportamento molecolare dell'acqua quando viene riscaldata e dallo stato liquido si trasforma in vapore. Trent'anni fa questo circoscritto terreno di ricerca produsse alcune delle teorie più potenti e provocatorie di tutta la fisica moderna. Si tratta di concetti ancora oggi quasi del tutto ignoti ai profani, ma che hanno permesso agli odierni fisici di stabilire avamposti permanenti in territori disparati come la sismologia, la fisiologia umana, la biologia evoluzionistica e l'economia.

VI

De magnete

> Nel mondo di oggi i poeti, gli storici e gli uomini d'affari affermano con arroganza che è inutile cercare di apprendere nozioni scientifiche, in quanto la scienza sta in fondo a un tunnel così lungo che a nessuna persona saggia verrebbe in mente di farvi capolino.
>
> *J. Robert Oppenheimer*[1]

> Ricerca di base significa tirare una freccia in aria e dipingere un bersaglio là dove atterra.
>
> *Homer Adkins*[2]

Quando il fisico russo Pëtr Kapitza, che diresse per trent'anni il celebre Istituto per i problemi fisici di Mosca, si recò in Inghilterra, qualcuno gli rivolse una curiosa domanda: gli chiese che significato avesse, secondo lui, il coccodrillo dipinto da anonimi sulla parete di un laboratorio della Royal Society. Kapitza studiò l'immagine da una certa distanza e alla fine concluse che stava a indicare il carattere della scienza. «Il coccodrillo non gira mai la testa indietro» disse. «Come la scienza, procede sempre avanti con le fauci splalancate.»[3]

Nel 1938, nel suo laboratorio di Mosca, Kapitza raffreddò l'elio fino all'incredibile temperatura di – 271 °C, appena due sopra lo zero assoluto. Sperava di vedere qualcosa di interessante in quel gelido regno e non fu deluso. Scoprì che nel processo di raffreddamento l'elio si trasforma prima in un comune liquido e poi in una delle sostanze più strane dell'universo: un superfluido. Un superfluido si può versare o conservare in un vaso come qualsiasi liquido, ma se lo si fa vorticare in una tazza, vortica per sempre, perché non presenta traccia di ciò

che hanno tutti i liquidi comuni: la viscosità, un attrito interno che alla fine frena il movimento. Il miele ha una notevole viscosità, l'acqua poca, il superfluido nessuna.[4]

Benché Kapitza trovasse strana e bizzarra la proprietà che aveva trovato, le fauci spalancate del «coccodrillo» scienza non smisero di avanzare. Entro pochi anni fu elaborata una teoria soddisfacente per l'elio superfluido e nel 1950 il fenomeno era stato definitivamente chiarito.

Nel 1600 il medico e scienziato inglese William Gilbert pubblicò *De magnete*, un monumentale trattato presto giudicato lo studio più esauriente che fosse stato compiuto sulle proprietà delle comuni calamite di ferro. I magneti di Gilbert attiravano chiodi, spade e ferri di cavallo e si attraevano o respingevano secondo il loro orientamento. Lo scienziato riportava anche un altro fenomeno meno noto: quando aveva infilato una calamita nella fornace di un fabbro, aveva constatato che, diventando incandescente, l'oggetto aveva perso la capacità di attirare i chiodi. Il calore molto forte annullava il magnetismo.

Si potrà pensare che le potenti fauci del coccodrillo scientifico abbiano risolto il mistero delle calamite già da secoli, ma non è così. La prima spiegazione plausibile del fenomeno osservato da Gilbert risale al 1907, oltre trecento anni dopo che era stato pubblicato *De magnete*. Occorsero altri quarant'anni perché i fisici scoprissero che quella prima teoria era del tutto errata e altri trenta perché la sostituissero con una migliore. Nel complesso, la scienza impiegò quasi quattro secoli per spiegare il funzionamento dei magneti. Nel corso delle loro ricerche, però, i fisici impararono una lezione importante: il mondo è più semplice di quel che appare e quando si ha a che fare con certi fenomeni, i dettagli non contano nulla.

Tra ordine e caos

Ogni atomo di una calamita è una piccolissima calamita che può essere orientata in qualsiasi direzione. Possiamo insomma figurarci l'interno di una calamita come un esercito di frecce. Già un secolo fa i fisici sapevano che la magnetizzazione di un pezzo di ferro era connessa all'organizzazione di quell'e-

sercito. La sbarra di ferro potrebbe trovarsi su un tavolo a temperatura ambiente o in stato di incandescenza all'interno di una fornace. Il problema è: come sono orientate le frecce?

Per natura gli atomi dotati di momento magnetico amerebbero allinearsi e, se lasciati liberi, lo farebbero, disponendosi in fretta in file ordinate come quelle di un disciplinato esercito. Ma le frecce devono contendere con un nemico che genera caos: il calore. La temperatura di un oggetto è una misura di quanta energia disorganizzata esso contenga; nell'aria tiepida le molecole si spostano molto più in fretta che nell'aria fredda. Nel ferro solido gli atomi non volano da una parte all'altra, ma vibrano in posizioni fisse, e le vibrazioni aumentano a mano a mano che il ferro si scalda. Così, se da un lato le forze magnetiche cercano di far allineare gli atomi, dall'altro il calore provoca scompiglio tra le loro file. Viene insomma condotta una guerra tra forze dell'ordine e forze del caos e il risultato determina il comportamento del magnete all'esterno.

Se la sbarra di ferro si trova su un tavolo a temperatura ambiente, la confusione tra le file è relativa e gli atomi riescono ad allinearsi. La forza di ciascun atomo è ovviamente infinitesima, ma il loro numero, anche in una calamita piccola, supera 10^{24} (cioè 1.000.000.000.000.000.000.000.000). Collaborando, i membri di quell'esercito qualcosa concludono e la calamita attira chiodi. Se invece il magnete diventa incandescente in una fornace, una tremenda tempesta di caos distruttivo annienta le forze dell'ordine. Una fotografia scattata in una circostanza del genere mostrerebbe un esercito allo sbaraglio. In tale situazione gli effetti di tutti i micromagneti si annullano e la calamita non attira più i chiodi (*figura 8*).

Questo è solo un esempio di ciò che i fisici chiamano «transizione di fase». Anche il ghiaccio che si scioglie nel gin and tonic o la pozzanghera che evapora dissolvendosi nell'aria sono transizioni di fase: il passaggio di una sostanza da una forma o «fase» all'altra. Sono tutti casi, questi, in cui il funzionamento interno dell'oggetto si modifica, perché l'organizzazione degli atomi o delle molecole cambia. Kapitza scoprì la transizione di fase in cui l'elio passava di colpo da liquido normale a superfluido.

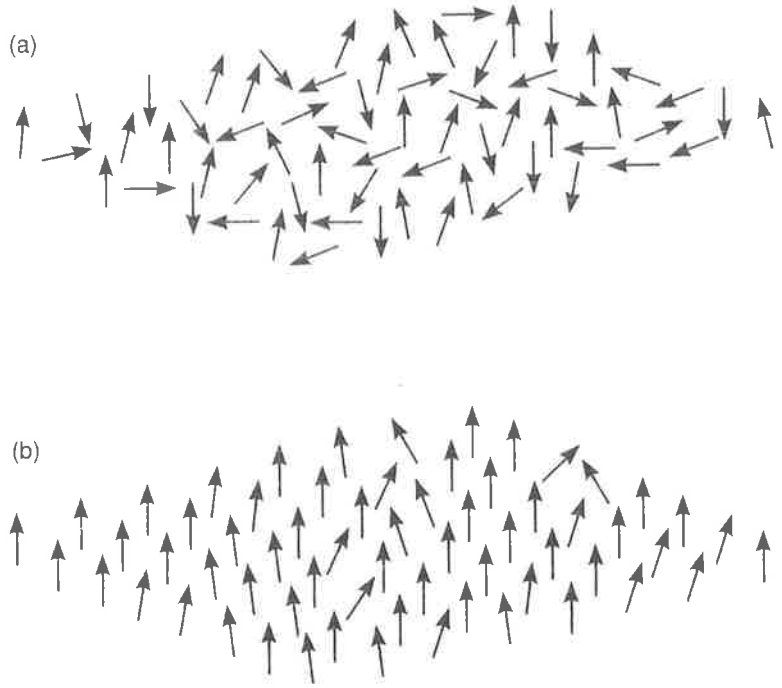


Figura 8. Ad alte temperature (a), gli atomi dotati di momento magnetico all'interno di un pezzo di ferro non riescono ad allinearsi: il rumore termico li eccita troppo. Ma se la temperatura scende sotto un dato livello critico (b), la battaglia ha esito opposto: essendo la tempesta più debole, gli atomi riescono a organizzarsi e il ferro si magnetizza.

Nel caso del magnete, dunque, tutto è abbastanza semplice: quando l'ambiente è freddo le forze dell'ordine hanno la meglio, quando è molto caldo la battaglia ha esito opposto e regna il caos. Ma la storia non finisce qui, perché ho tralasciato un punto molto interessante. A una temperatura intermedia le forze dell'ordine e del caos si trovano in una situazione di stallo che si chiama punto critico e che nel ferro si registra a 770 °C. Che cos'accade allora all'esercito di frecce? Che cos'accade quando atomi e molecole non sono né organizzati né disorganizzati, ma in bilico sul delicato confine tra ordine e caos? Per trovare una risposta un fisico degli anni Quaranta compì un viaggio nella Terra Piatta.

Storia di Onsager

Nell'autunno del 1941, quando l'esercito tedesco occupò quasi tutta l'Europa occidentale e settentrionale, tra cui la Finlandia, la Danimarca e la Norvegia, il fisico norvegese Lars Onsager ebbe la fortuna di trovarsi lontano: da circa dieci anni lavorava in America, all'università di Yale a New Haven, nel Connecticut. Forse stava tentando di scacciare il pensiero terribile della sua patria invasa dai nazisti o forse era solo spinto da un'insaziabile curiosità; fatto sta che si impegnò in uno dei più complessi calcoli mai effettuati da un essere umano.

In qualsiasi calamita il rumore termico eccita le «frecce atomiche», che vanno continuamente ora in una direzione ora nell'altra. Poiché perfino un magnete molto piccolo contiene un numero astronomico di atomi, è ovviamente impossibile prevedere tutti i loro movimenti con assoluta esattezza. Per fortuna Onsager aveva un obiettivo un po' più realistico. Immaginiamo di essere responsabili del servizio d'ordine quando una folla di centomila tifosi di calcio sciama nello stadio. Non ci cureremmo molto del tragitto specifico di un Joe Bloggs, un Jimmy Smith o un qualunque altro individuo diretto al suo posto, ma cercheremmo di sapere quante sono, in media, le persone che entrano dall'ingresso nord, dall'ingresso est e da tutti gli altri ingressi. Onsager voleva trovare informazioni analoghe sulla folla atomica. Lasciamo dunque stare i singoli micromagneti e proviamo a chiederci come sarebbe in media la configurazione di frecce nel punto critico.

Gli agenti del servizio d'ordine degli stadi non hanno modo di calcolare la risposta: imparano attraverso la dura esperienza. In teoria Onsager si trovava in una posizione migliore, perché la fisica dispone di un potente metodo per calcolare simili medie: una sua branca, la meccanica statistica, studia infatti le proprietà dei sistemi macroscopici come conseguenza del comportamento medio dei loro innumerevoli componenti microscopici (tipo atomi e molecole), e la sua «ricetta» fondamentale è chiamata formula di Gibbs, dal nome del fisico americano Josiah Willard Gibbs, che la elaborò nel 1902. La formula consiste in alcune equazioni che ricordano quelle di

Newton, solo che riguardano le medie anziché il moto di singoli oggetti come i pianeti. Nel caso del magnete, però, Onsager scoprì che nemmeno quella poteva aiutarlo. Poiché ogni atomo dotato di momento magnetico influisce su ciò che fanno tutti gli altri atomi all'interno del magnete, seguire la ricetta significa rimanere intrappolati in una giungla matematica nella quale il fisico norvegese in effetti si trovò invischiato.

Intendeva però applicare la formula a qualcosa, sicché prese una decisione drastica: visto che la realtà era troppo complessa, pensò che convenisse semplificarla. Innanzitutto immaginò un magnete nel quale le singole frecce non potessero orientarsi in quattro, ma solo in due direzioni, l'alto e il basso; poi assunse che ciascun atomo non influenzasse tutti gli altri, ma solo i pochi che gli stavano vicino. Come primo passo si presentava promettente, ma era ancora troppo difficile seguire la formula, sicché egli decise di allontanarsi ancora di più da una realtà troppo complessa. È chiaro che i magneti reali si trovano, come tutti noi, nel normale spazio tridimensionale; ebbene, Onsager strappò il magnete immaginario da quello spazio normale e lo intrappolò in due sole dimensioni, nella Terra Piatta dove sarebbe stato costretto a «vivere» come un insetto tra due lastre di vetro.

Per figurarci il risultato, proviamo a pensare che una serie di micromagneti si trovi sui riquadri di una scacchiera e che ciascuna freccia possa influenzare solo le quattro vicine. Il magnete ideale è una copia quasi grottesca di quello reale, ma Onsager procedette per la sua strada, che per quanto semplificata risultò tutt'altro che facile. La «ricetta» della meccanica statistica impone infatti di considerare, una alla volta, tutte le possibili configurazioni di orientamenti verso l'alto e verso il basso. In una scacchiera di cento magneti per lato, il numero delle configurazioni è $2^{10.000}$, che equivale a 1 seguito da molte migliaia di zeri. Cifre del genere sono inconcepibili per noi. Se ci mettessimo a tracciare su fogli tutte quelle configurazioni, moriremmo molto prima d'aver finito e anche se potessimo vivere in eterno, riempiremmo l'intero universo di carta fino a intasarlo già ai primi stadi dell'operazione.

Onsager però non si scoraggiò e nell'inverno del 1940 co-

minciò a calcolare, sperando che emergesse qualcosa di interessante. «Era il tipo d'indagine in cui si parte da una buona intuizione e si sente di doverla seguire a ogni costo; e lungo la strada ecco che se ne ha un'altra» disse molti anni dopo «e insomma le intuizioni si susseguono senza soluzione di continuità, tutte troppo buone per essere scartate.»[5] Benché vi fossero innumerevoli configurazioni delle frecce, scoprì che, con alcuni trucchi matematici, si potevano suddividere tutte quante in gruppi, il che consentiva di affrontare in una sola volta numeri iperbolici di atomi.

Seguendo intuizioni come questa per quasi un anno, alla fine arrivò in fondo alla «ricetta». Con sgomento, però, scoprì di avere scassinato una cassaforte matematica solo per trovarne al suo interno un'altra. La matematica che descriveva il comportamento medio del magnete bidimensionale simulato non permetteva ancora di capire bene lo stato critico. Dovette sudare per altri sei anni, stavolta aiutato da Bruria Kaufman, un giovane studente di talento, per cominciare a comprendere alcune delle caratteristiche più interessanti della configurazione di frecce.

Supponiamo che, in mezzo alla folla dei compagni, un micromagnete X sia orientato verso l'alto. In che modo influenza un altro micromagnete posto a una certa distanza? I fisici la chiamano «correlazione» tra i magneti e, per il magnete bidimensionale nel punto critico, Onsager e Kaufman trovarono un curioso risultato. Se la configurazione di atomi fosse stata del tutto casuale, qualsiasi coppia avrebbe avuto esattamente il 50 per cento di probabilità di indicare la medesima direzione (ricordiamoci che possono orientarsi solo verso l'alto o il basso); ma i calcoli dimostrarono che più due atomi erano vicini, più probabilità avevano di allinearsi.

In fondo è un risultato ragionevole e non troppo trascendentale. Ogni volta che Onsager e Kaufman raddoppiavano la distanza tra una coppia di micromagneti, la lieve tendenza che essi avevano a orientarsi nella stessa direzione diminuiva di 1,19 volte; e ciò valeva sia per gli atomi separati da 10, 100 o 1000 riquadri, sia per quelli separati da 100.000 o 100 milioni di riquadri. Quella sì che era una notizia trascendentale: la

legge matematica che emergeva dal risultato era infatti una legge della potenza.

Da una fazione all'altra

A buon diritto il computer digitale è stato definito «il più importante progresso epistemologico del metodo scientifico dopo l'invenzione di congegni per misurare il tempo in maniera accurata».[6] All'epoca di Onsager e Kaufman ovviamente non esisteva, ma oggi sì, e rappresenta il sistema di gran lunga più efficace per arrivare a comprendere l'essenza della loro legge della potenza. Con un computer veloce non è difficile disporre 250.000 atomi su una griglia e vedere che cosa succede. Un buon metodo consiste nel considerare diverse temperature e nell'evidenziare le relative configurazioni colorando di bianco i micromagneti orientati verso l'«alto» e di nero quelli orientati verso il «basso». Proviamo ad analizzare le immagini così ottenute (*figura 9*).[7]

Le prime due immagini (a e b) riguardano il magnete sopra o sotto la temperatura critica. Come previsto, il rumore termi-

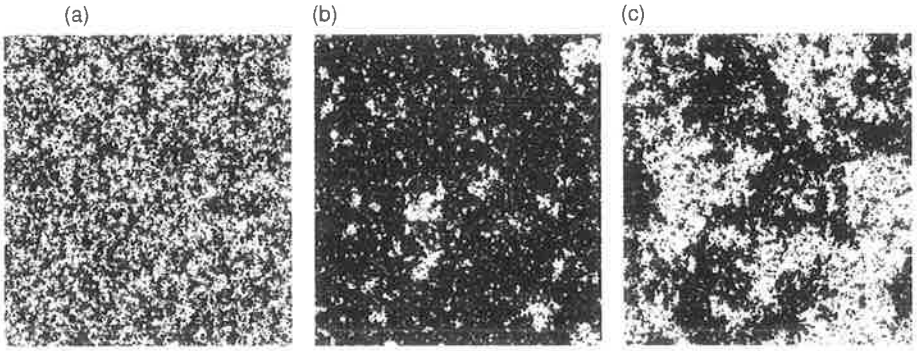


Figura 9. Al di sopra del punto critico (a), il magnete bidimensionale si trova nel caos. Gli atomi dotati di momento magnetico sono orientati verso l'alto (bianco) e verso il basso (nero) con uguale probabilità, e il fatto che uno di essi sia orientato verso l'alto non significa assolutamente che lo siano anche i suoi vicini. Al di sotto del punto critico (b), si instaura un regime d'ordine dove quasi tutti i micromagneti sono allineati tra loro. Il vero e proprio punto critico (c) è una curiosa terra di nessuno posta tra l'ordine e il caos, nella quale gli atomi bianchi e neri formano fazioni di ogni dimensione che si mischiano e si spostano continuamente. (Immagini tratte da J.J. Binney et al., *An Introduction to the Theory of Critical Phenomena*, Oxford University Press, 1992. Riproduzione autorizzata.)

co domina al di sopra del punto critico, sicché i micromagneti sono in preda allo scompiglio. Ciascuno punta in continuazione in su o in giù del tutto a caso: è il regno del puro caos e l'immagine ricorda quella delle scariche statiche nei televisori mal sintonizzati. A una temperatura al di sotto del punto critico, invece, quasi tutti gli atomi sono allineati, in questo caso verso il «basso», sicché vediamo un campo quasi tutto nero.[8] Fin qui niente di strano.

Ora prendiamo la seconda immagine e aumentiamo un poco la temperatura avvicinandola di più al punto critico. Il quadro comincia a farsi più interessante: anche se la maggior parte dei micromagneti resta allineata come prima, alcune sacche bianche di «dissenzienti» cominciano a invadere il campo. Se si aumenta ulteriormente la temperatura, le sacche diventano sempre più numerose. Alla fine, quando ci avviciniamo alla temperatura critica (c), le fazioni di magneti dissenzienti crescono a tal punto che si potrebbe percorrere idealmente l'intera immagine senza mai lasciare il bianco o, se si preferisce, senza mai lasciare il nero. Questa è la criticità: la condizione del magnete in preciso equilibrio tra lo stato magnetico e lo stato non magnetico. L'immagine rivela il significato della legge della potenza.

Nel punto critico le fazioni di micromagneti hanno le dimensioni più disparate: si va da atomi isolati a enormi raggruppamenti che coprono l'intera superficie dell'oggetto. Se aggiungessimo altri micromagneti per produrre un'immagine ampia come gli Stati Uniti, accadrebbe lo stesso: le fazioni andrebbero da piccole sacche a immense macchie estese da New York a Los Angeles. Come abbiamo visto nel III e nel IV capitolo, la regolarità geometrica di qualsiasi legge della potenza comporta l'assenza di una scala tipica, una caratteristica che emerge con estrema chiarezza dall'immagine del punto critico, che è un frattale. Ma in realtà le immagini non sono in grado di descrivere le proprietà dello stato critico, il quale è in continuo mutamento.

Se scattassimo fotografie in momenti diversi, vedremmo il costante mutare delle alleanze tra fazioni; alcune scomparirebbero, altre si formerebbero. Lo stato critico è soggetto a gigante-

sche fluttuazioni ed è sempre a un passo dal mutamento improvviso e radicale. Dire che è «ipersensibile» è dire poco. Poiché l'esercito di frecce è in bilico sul precipizio che si apre tra le due fasi, ossia tra le forze del caos e quelle dell'ordine, anche un'influenza minima può spingerlo oltre l'orlo. Basterebbe che un unico atomo passasse agli «avversari» per indurre un esercito di altri atomi a imitarlo con una valanga di defezioni.

Ma procediamo con calma, senza saltare alle conclusioni. Onsager iniziò la ricerca analizzando quello che, per sua stessa ammissione, era un modello molto semplificato. Le immagini computerizzate che abbiamo appena preso in considerazione provengono da una simulazione altrettanto semplificata: quella di un magnete che «vive» sotto tortura nella Terra Piatta. Che cos'accade se restituiamo al quadro buona parte delle caratteristiche reali? Che cos'accade nelle vere calamite? E come si comportano altre sostanze come l'acqua o l'elio di Kapitza? Per rispondere a tali domande occorre dare un'occhiata alle cifre.

Classi di universalità

L'1,19 della legge della potenza di Onsager e Kaufman è una sorta di etichetta matematica di quel particolare stato critico. Per quanto riguarda le leggi della potenza citate nei precedenti capitoli, abbiamo visto che restano uguali se si passa da una scala all'altra all'interno del medesimo sistema, ma che, quanto a cifre esatte, variano a seconda dei sistemi. La legge di Gutenberg-Richter dice che al raddoppiare dell'intensità il sisma diventa quattro volte più raro; nel caso delle patate congelate, invece, al raddoppiare delle dimensioni i frammenti diventano sei volte più rari. Ciascuna di quelle cifre corrisponde naturalmente a un particolare tipo di configurazione frattale autosimilare. Per definire con maggiore esattezza il carattere dello stato critico, i fisici tengono quindi conto non solo del tipo di legge della potenza, ma anche dell'esponente che comporta.

Insomma vi sono molti stati critici diversi con numeri critici[9] di valore diverso, ed è lecito presumere che emergano in transizioni di fase relative a sostanze diverse, sia reali sia im-

maginarie, come il magnete di Onsager. Il numero critico del modello di Onsager è 1,19; è quindi probabile che la calamita vera ne abbia un altro, visto che il fisico norvegese ignorò molte caratteristiche reali quando mise a punto la sua simulazione. È inoltre probabile che anche i numeri critici per gli stati critici di altre transizioni di fase siano diversi l'uno dall'altro. Le interazioni tra gli atomi di un gas o di un liquido sono profondamente differenti da quelle tra micromagneti: i primi si muovono veloci e collidono, mentre i secondi stanno fermi e cambiano solo orientamento. Nel caso dell'elio superfluido, poi, valgono le leggi della meccanica quantistica e le forze all'opera non sono del tipo che siamo soliti affrontare.

Così i ricercatori che negli anni Sessanta studiavano la condensazione di sostanze eterogenee come ossigeno, neon e ossido di carbonio si sbalordirono quando trovarono gli stessi esatti numeri critici. Si stupirono ancora di più quando i medesimi numeri emersero dalle transizioni di fase riguardanti la miscelazione e separazione di sostanze chimiche, un fenomeno che non presentava la benché minima somiglianza con il passaggio dallo stato di vapore allo stato liquido. Ancora più incredibile fu che quei numeri critici apparissero nei calcoli inerenti alla versione tridimensionale del magnete simulato di Onsager, un modello assai rozzo di magnete, che ovviamente non aveva alcun rapporto con la miscelazione o la condensazione.

Nel 1965 i fisici si trovarono di fronte a un'ipotesi sbalorditiva: che lo stato critico e il formarsi di fazioni apparissero in qualsiasi transizione di fase e che il carattere matematico dello stato critico non dipendesse in alcun modo dalle sostanze o dagli oggetti coinvolti nel fenomeno. L'ipotesi, con tutto il suo fascino, rimase vaga finché, nel 1970, un giovane fisico dell'università di Chicago non le diede basi più solide. Se è vero che pochissimi elementi parevano contare, Leo Kadanoff trovò quali fossero quei pochi.

Nel punto critico, sacche di organizzazione possono formarsi e scomparire in qualsiasi posto e in qualsiasi momento – e lo fanno – perché le fazioni crescono e poi spariscono in continuazione. Quanto grandi diventano le fazioni? Con che rapidità si

dissolvono? Questi interrogativi sono tutti riconducibili a un fondamentale problema geometrico: con quanta facilità l'influenza dell'ordine in un punto porta a un ordine analogo nel punto vicino? Non si tratta di fisica, ma di geometria. In un comune magnete del normale mondo tridimensionale, qualsiasi atomo dotato di momento magnetico può influenzare i suoi vicini in tre direzioni indipendenti; nel modello bidimensionale, invece, una delle direzioni è stata eliminata.

Studiando i numeri critici che emergevano dagli stati critici relativi a diversi tipi di transizioni di fase, Kadanoff scoprì che la dimensione fisica dell'oggetto, dello spazio stesso in cui «vive», è un fattore determinante. Osservò inoltre che l'unico altro fattore importante è la forma dei singoli componenti. Nel gas xeno, per esempio, ciascun atomo è come una piccola palla da biliardo: può muoversi in giro, ma non «puntare». In un magnete gli atomi sono come frecce e possono «fare» di più, perché in linea di principio sono in grado di orientarsi in diverse direzioni. Quando i singoli atomi hanno varie opzioni, è lecito supporre sia più difficile che l'ordine si propaghi da un punto all'altro e senza dubbio tale proprietà influisce sulla forma precisa dell'autosimilarità nello stato critico.

Kadanoff scoprì che, incredibilmente, non conta nient'altro.[10] Non le masse atomiche e le cariche elettriche delle particelle; né se le particelle sono atomi di ossigeno, azoto, cripto, nichel o ferro e se sono atomi singoli o molecole più complesse costituite da decine o centinaia di atomi. Insomma sono ininfluenti il tipo di particella e la forza o debolezza delle sue interazioni: niente di tutto questo incide minimamente sull'organizzazione dello stato critico. Un simile, incredibile portento fu definito dai fisici «universalità dello stato critico», e ormai è stato confermato da migliaia di esperimenti e simulazioni al computer.

Nello stato critico le forze conflittuali dell'ordine e del caos si trovano in un equilibrio difficile, perché non arrivano mai a vincere o perdere del tutto. Inoltre il carattere della battaglia, la quale cambia e si modifica in continuazione, è lo stesso indipendentemente dalla specificità del fenomeno. Contano la dimensione fisica dell'oggetto e la forma dei suoi componenti, come frecce o punti: nient'altro.

Proviamo allora a fare un piccolo ma utile esperimento ideale e immaginiamo il mondo teorico di tutte le sostanze concepibili. Tale mondo si dividerà naturalmente in nazioni: ci sarà la nazione degli «oggetti simili a frecce in un contesto tridimensionale», quella degli «oggetti simili a punti in un contesto unidimensionale» e così via. I fisici chiamano simili nazioni «classi di universalità».[11] Il miracolo dell'universalità consiste in questo: quando due sostanze, reali o immaginarie che siano, rientrano nella medesima classe, presentano la stessa esatta organizzazione della criticità, a prescindere da quanto divergano sotto tutti gli altri profili.

La criticità autorganizzata

Abbiamo compiuto una breve digressione per chiarire che cos'è lo stato critico e quali sono le sue peculiari proprietà. Ora siamo pronti ad affrontare le implicazioni più profonde del concetto, a capire perché, attraverso l'universalità dello stato critico, la natura abbia fatto agli scienziati un bellissimo dono.

Poiché tutti i sistemi fisici rientrano in classi di universalità, se si comprende lo stato critico in un sistema qualunque di una classe, si comprendono giocoforza tutti i sistemi di quella classe. Ma non bisogna dimenticare che anche la più rozza simulazione, come quella di Onsager, rientra nelle classi di universalità; così, per studiare un sistema fisico reale nello stato critico, si possono benissimo tralasciare tutte le peculiarità concrete e complesse del sistema per concentrarsi sul modello matematico più semplice appartenente alla medesima classe di universalità. La simulazione può essere assai rudimentale, infrangere le leggi della fisica e ignorare quasi tutte le componenti del sistema reale; ma, purché siano rispettati i due fattori che abbiamo visto essere essenziali, avrà sicuramente lo stesso identico comportamento critico del sistema reale. Anche i modelli più elementari funzionano esattamente come l'oggetto reale.[12]

Questo ci riporta alle critiche mosse al modello del terremoto. Il modello dei blocchi e delle molle che abbiamo analizzato nel V capitolo non aveva la benché minima relazione con la

vera crosta terrestre. Non comprendeva certe proprietà delle rocce reali né rispettava dati concreti, come il fatto che i sismi non si presentano in singole faglie, ma in sistemi di faglie. Per ripetere una domanda che ci siamo già rivolti: come può una deliberata falsificazione della fisica consentire di comprendere i veri terremoti? Se la simulazione al computer produce la legge di Gutenberg-Richter, non lo farà per una semplice, banale coincidenza?

Stavolta, ponendoci l'interrogativo, possiamo contare su una visione più articolata. Sappiamo infatti che è possibile comprendere l'organizzazione generale di un sistema nello stato critico anche se si trascurano i singoli elementi distintivi (fatti salvi i due essenziali che sappiamo). Considerate la legge della potenza di Gutenberg-Richter e la distribuzione autosimilare dei terremoti nel tempo, è lecito arguire che la crosta terrestre sia nello stato critico e che le sue variazioni nel tempo e nello spazio non abbiano un comportamento medio o tipico. Tale constatazione toglie vigore alle critiche di ipersemplificazione. Sembra sia realmente possibile capire il funzionamento della crosta attraverso modelli assai semplificati, come quello dei blocchi e delle molle di Burridge e Knopoff o come quelli più recenti di Bak e Tang e di Olami, Feder e Christensen.[13]

Siamo così arrivati a quella che potremmo definire una teoria della criticità. I sistemi che si trovano nello stato critico tendono ad avere un'organizzazione simile, la quale non deriva dalle caratteristiche specifiche del sistema o dei suoi componenti, ma dalle fondamenta geometriche e logiche che stanno a monte. La criticità si genera indipendentemente dalla natura dei sistemi. In breve, il carattere essenziale di un oggetto nello stato critico si può comprendere anche ignorando la sua specificità.

Vedremo presto che molti altri fenomeni, come l'economia, gli ecosistemi, perfino la storia della scienza, condividono aspetti di tale organizzazione. Ora che abbiamo analizzato le transizioni di fase e che ci prepariamo a esaminare quei fenomeni, possiamo fare una previsione: poiché vi sono pochi tipi di stati critici, pochi se ne trovano anche nel mondo reale. In altre parole, sistemi che si presentano assai diversi celano, nella loro organizzazione, somiglianze profonde.

VII

La criticità autorganizzata

Gli obiettivi del pensiero scientifico sono di vedere il generale nel particolare e l'eterno nel transitorio.

Alfred North Whitehead[1]

Lo scopo dei modelli non è di corrispondere ai dati, ma di rendere sempre più precise le domande.

Samuel Karlin[2]

Nel primo pomeriggio del 2 dicembre 1942, un gruppo di fisici scese le scale che portavano al campo di squash sotto lo stadio di football dell'università di Chicago e si accinse a condurre uno storico esperimento. In un laboratorio di fortuna installato in una delle palestre sotterranee, l'équipe aveva costruito il primo reattore nucleare del mondo: in un enorme blocco di grafite erano stati praticati dei fori nei quali erano state inserite lunghe barre di uranio arricchito. Sei anni prima Enrico Fermi, il cervello del progetto, aveva scoperto che, quando venivano bombardati da neutroni, i nuclei di uranio potevano scindersi e liberare altri neutroni, i quali colpendo altri nuclei di uranio avrebbero prodotto – in teoria – ulteriori fissioni e una valanga di ulteriori neutroni, in una reazione nucleare autoalimentante.

Questo in linea di principio. La teoria diceva anche che, se non si stava attenti, il reattore si sarebbe attivato da solo; ogni tanto, infatti, i nuclei di uranio si disintegrano da sé liberando neutroni. Nelle condizioni giuste, anche un solo neutrone avrebbe potuto innescare una reazione a catena. Per impedire che la pila atomica esplodesse, Fermi aveva inserito barre di

controllo di cadmio tra le barre di combustibile di uranio. Il cadmio teneva sotto controllo la pila catturando neutroni e assicurando che la valanga innescata da un singolo neutrone morisse sul nascere. Ma quel giorno Fermi stava per togliere il freno al congegno e vedere che cos'accadeva.

Poco dopo le tre del pomeriggio, tutti trattennero il fiato quando afferrò una corda e cominciò a estrarre con molta delicatezza le barre di cadmio dalla grafite. Il fisico Eugene Wigner, che si teneva pronto a celebrare l'evento con una bottiglia di Chianti, era nervoso ma pieno di speranza. Mentre le barre uscivano lentamente, il contatore Geiger registrò un lieve ticchettio; ma poco dopo si mise a crepitare come una mitragliatrice. Fermi aveva calcolato con precisione fino a che punto poteva spingersi prima di innescare una catastrofica reazione a catena; alle tre e trentasei, quando si avvicinò a quel punto, il contatore Geiger impazzì, ed egli allora smise di estrarre le barre di cadmio. Aveva portato la pila a un soffio dal punto critico, nel quale un solo neutrone avrebbe potuto scatenare una reazione inarrestabile.

Il succo della storia è che niente raggiunge il punto critico da solo. È necessaria la regolazione esterna. Che si tratti di un magnete o di un reattore nucleare, occorre uno sforzo per produrre lo stato critico nel quale un evento di minima entità scatena uno sconvolgimento di gigantesche e durevoli proporzioni. Se si getta un vecchio pezzo di ferro in una fornace, esso raggiungerà lo stato critico quando si riscalda; ma per mantenerlo a una temperatura molto vicina a 770 °C occorre un'attenta regolazione: se si sbaglia di uno o due gradi, non si vedrà formarsi alcuna fazione. Ecco perché, nel 1987, Bak, Tang e Weisenfeld rimasero perplessi, per non dire sbalorditi, quando videro che il semplice modello del mucchio di sabbia si autorganizzava nella criticità. La loro simulazione faceva cadere, con lentezza e del tutto a caso, i granelli su una superficie piatta. Il mucchietto, crescendo, diventava più ripido; poi cominciavano le valanghe. In un primo tempo rotolavano giù solo pochi granelli, ma quando il mucchio aumentava, aumentavano anche le dimensioni delle valanghe. Alla fine il monticello entrava nello stato critico ed era soggetto a valan-

ghe di tutte le dimensioni, come lo era stata la pila atomica quando Fermi aveva cominciato a togliere le barre di controllo. Tuttavia Bak, Tang e Weisenfeld non avevano né estratto barre né girato manopole per produrre quella condizione: il sistema si era organizzato da solo nello stato critico.

I tre fisici, che sapevano riconoscere un portento quando ne vedevano uno, definirono il fenomeno «criticità autorganizzata». Per la prima volta nella storia, si osservava un sistema in cui l'affascinante organizzazione dello stato critico si produceva del tutto spontaneamente, senza alcuna regolazione esterna, ed era dotata di resilienza. Se anche si distruggeva metà mucchio, non importava: a mano a mano che i granelli cadevano, il mucchietto tornava a organizzarsi nello stato critico. Nessuno penserà mai di trovare in natura una calamita nello stato critico: per un magnete una simile condizione è assolutamente speciale. Ma quando, come nel caso del mucchio di sabbia, si vede che lo stato critico origina senza intervento esterno, viene spontaneo supporre che quel sistema non sia l'unico dotato di una proprietà così singolare.

Isaac Newton descrisse le leggi del moto dei pianeti, che risultarono valere anche per le comete, le gocce di pioggia, i satelliti, i fluidi, gli aeroplani, le mele che cadono dall'albero e qualsiasi altro oggetto sulla terra e oltre. Max Planck abbozzò la teoria quantistica mentre cercava di spiegare il tipo di radiazione emesso da oggetti incandescenti, e la sua scoperta ebbe presto conseguenze su tutti i settori della fisica. Dopo una grande scoperta, gli scienziati cominciano d'un tratto a vedere dappertutto ciò che prima non avevano notato.

Abbiamo già osservato come la criticità autorganizzata paia spiegare il funzionamento turbolento e imprevedibile della crosta terrestre, che si trova in un perenne stato critico. Il lento, inesorabile spostamento delle placche continentali equivale alla caduta dei granelli di sabbia e ha ridotto la crosta in una condizione in cui l'equivalente delle valanghe, cioè lo slittamento dei labbri delle fratture, produce terremoti di tutte le dimensioni. Esistono al mondo altri fenomeni altrettanto complessi, ma che hanno alla base la stessa semplice matematica del modello del mucchio di sabbia? Per più di dieci anni intor-

no a questa domanda si è dibattuto «con febbrile accanimento».[3] I fisici non hanno ancora trovato tutte le risposte, ma quelle che hanno trovato sono sottili e affascinanti.

Tanti modi di bruciare

Non è certo facile capire che cosa rese così terribile il grande incendio del Parco nazionale di Yellowstone del 1988. Come, dove e perché il fuoco si propaghi dipende dal tipo di alberi del bosco, da quanto vicini questi siano e dall'intersecarsi delle aree di foresta e prateria. I venti alimentano le fiamme, mentre la pioggia le rallenta. È importante anche la storia della foresta: in certe regioni la vegetazione è assai più antica che in altre, e questo influenza l'infiammabilità. Barriere naturali come i fiumi ritardano l'avanzata dell'incendio, ma a volte qualche brace viene soffiata dal vento di là dal corso d'acqua e appicca nuovi incendi un chilometro più avanti.

Considerati tali molteplici fattori, non c'è da stupirsi se gli scienziati hanno, nella previsione dei grandi incendi, lo stesso successo che in campo sismologico. Se a Yellowstone il Servizio forestale degli Stati Uniti fu preso completamente alla sprovvista, fu perché erano troppi gli elementi di cui tenere conto. Ma forse vi fu anche una ragione più profonda. Nel 1998 i geologi Bruce Malamud, Gleb Morein e Donald Turcotte, della Cornell University, raccolsero copiosi dati sugli incendi scoppiati nell'ultimo secolo nelle foreste americane e australiane. Le dimensioni di un incendio si calcolano in base a quanti alberi bruciano o all'area che il fuoco consuma. Qual era, dunque, la media che si era registrata in un secolo?

Lì per lì si poteva pensare che, nel corso della storia, le forze distruttive della natura e i tentativi degli uomini di combatterle avessero condotto a una situazione di stallo. Per appurare se così era davvero, Malamud e i suoi collaboratori elaborarono dei grafici indicanti con che frequenza venissero consumati dalle fiamme un chilometro quadrato, dieci chilometri quadrati e così via. Stranamente, videro che non c'era una dimensione tipica. I dati relativi a 4284 incendi scoppiati tra il 1986 e il 1995 nel territorio del Fish and Wildlife Service

americano rivelavano invece un'evidente legge della potenza. La regolarità geometrica era evidente: al raddoppiare dell'area incendiata, la frequenza diminuiva di 2,48 volte e la legge risultava valere per ogni genere di incendi, anche quando le dimensioni variavano di un fattore di un milione. In altre parole, nonostante la grande complessità del modello di diffusione delle fiamme, il rapporto tra frequenza e dimensioni appare estremamente semplice: una legge di Gutenberg-Richter per gli ecosistemi.

Ricordiamoci che una legge della potenza comporta invarianza di scala, e che quindi i macroeventi sono solo copie ingrandite dei microeventi e hanno le medesime cause. I sismi catastrofici non sono provocati da fattori particolari, ma sono la conseguenza naturale, ancorché infrequente, della generale organizzazione critica della crosta terrestre, le cui placche, scivolando, possono produrre grandi reazioni a catena. I ricercatori della Cornell scoprirono che lo stesso principio valeva per gli incendi boschivi, non solo negli Stati Uniti, ma anche in Australia e forse in qualsiasi parte del mondo. Quando scoppia, l'incendio «non sa quanto diventerà grande», per usare l'espressione di Christopher Scholz a proposito dei terremoti. Le fiamme si propagano nel modo in cui si propagano perché le foreste sono organizzate nello stato critico, e l'ampiezza che raggiungerà un particolare incendio dipende perlopiù dal caso.

Questo, almeno, è quanto pare lecito arguire dai dati. Certo, di per sé una legge della potenza consiste solo di cifre; anche se magari indica che i macrosismi hanno le stesse cause dei microsismi, può non convincere lo scettico. Per capire meglio l'origine della legge relativa agli incendi, Malamud e i suoi colleghi compirono un ulteriore passo. Nel VI capitolo abbiamo chiarito il concetto di classi di universalità e visto che i sistemi che si trovano nello stato critico hanno la stessa organizzazione a prescindere dalle loro peculiarità, per cui è possibile elaborare un modello fedele alla logica fondamentale del fenomeno tralasciando le differenze. Che cos'è essenziale negli incendi boschivi?

Per quanto riguardava la propagazione, i ricercatori della

Cornell rilevarono tre principi: primo, le foreste sono composte di alberi, i quali in assenza di interventi esterni tendono col tempo ad aumentare di numero; secondo, ogni tanto alcuni alberi prendono fuoco; terzo, il fuoco si estende ad alberi vicini. Un silvicultore giudicherebbe tale quadro essenziale una semplificazione così smaccata da rasentare l'assurdo; tuttavia Malamud e i suoi collaboratori introdussero quei tre principi in un modello matematico e condussero la simulazione al computer.

Come quella del mucchietto di sabbia, la simulazione dell'incendio è condotta su una griglia e a ogni unità di tempo che passa il computer pianta un albero su un riquadro a caso. Pian piano gli alberi, spuntando in tutta la foresta, aumentano di numero e ogni tanto, quando ne sono cresciuti un po', viene gettato un fiammifero in un riquadro a caso. Vi sono quindi alberi che spuntano uno dopo l'altro allo stesso intervallo e fiammiferi che cadono sui riquadri a un ritmo più lento, per esempio di uno ogni 200 o 400 alberi germogliati. Il fiammifero non fa niente se atterra su un riquadro vuoto, ma se colpisce un albero gli appicca fuoco. A quel punto la regola è che la pianta in fiamme appicchi fuoco a qualunque pianta occupi uno dei quattro riquadri contigui. Tutto qui. La simulazione fa crescere gli alberi a caso, ogni tanto appicca fuoco ad alcuni di essi e lascia che il fuoco, se deve, si propaghi.

Non sono previste barriere, come fiumi o strade, all'incendio: gli unici ostacoli sono rappresentati dai riquadri vuoti a cui le fiamme non possono trasmettersi. Gli alberi sono di un solo tipo, hanno tutti la stessa probabilità di prendere fuoco e bruciano tutti allo stesso ritmo. Infine, non esistono né pompieri né influenze meteorologiche. Tuttavia, in virtù del concetto di universalità, l'andamento del modello ben s'accorda con i dati degli incendi veri. Malamud e i suoi collaboratori condussero parecchie simulazioni, contando ogni volta le aree bruciate della griglia. Come nelle foreste reali, gli incendi piccoli apparivano assai più numerosi dei grandi; ma la concordanza non era solo generica, perché dal modello emergeva anche una legge della potenza quasi perfetta.[4] La rete di alberi sulla griglia si autorganizzava in uno stato critico in cui qual-

sivoglia fiammifero poteva provocare un incendio di qualsivoglia dimensioni, dalle più piccole a quelle così grandi da distruggere l'intera foresta.

Basandosi sulla notevole corrispondenza che il modello, pur nella sua semplicità, aveva con la realtà, Malamud, Morein e Turcotte conclusero che la crosta terrestre non è la sola ad autorganizzarsi nello stato critico: lo fanno anche le foreste, se l'uomo non interviene. La precisazione è necessaria, perché il modello rivelò anche un risvolto inatteso che potrebbe addirittura aiutare il Servizio forestale degli Stati Uniti a contenere in futuro il numero degli incendi catastrofici.

Lo stato supercritico

L'incendio di Yellowstone del 1988 divorò seicentomila ettari. Abbiamo visto che non ha senso cercare cause specifiche degli eventi catastrofici nel caso dei sistemi che si trovano nello stato critico. La mera esistenza della criticità comporta lo scoppio periodico di grandi incendi, perché la foresta, come il reattore nucleare di Fermi, è sempre sull'orlo di una reazione a catena. Ma pare che le foreste di Yellowstone e di altri parchi americani fossero in una situazione ancora peggiore. Se Fermi non avesse smesso di estrarre dalla pila le barre di cadmio, si sarebbe prodotta una reazione a catena nella quale ciascun neutrone avrebbe scatenato una valanga di fissioni che avrebbe liberato una valanga di altri neutroni secondo una progressione geometrica; e in quel caso nessuno avrebbe festeggiato con il Chianti di Wigner. Purtroppo, in quest'ultimo secolo, il ministero delle Foreste degli Stati Uniti ha seguito una politica che è forse l'equivalente ecologico dell'estrazione improvvisa delle barre di controllo, per cui le foreste, anziché essere sull'orlo di una reazione a catena, hanno già imboccato irreparabilmente la via del disastro. E il modello mostra perché.

Ricordiamoci che il computer getta il fiammifero periodicamente. Malamud e i suoi colleghi potevano alterare la frequenza dell'evento, e la alterarono: in alcune simulazioni fecero cadere il cerino ogni cento alberi e in altre ogni duemila.

Nel primo caso i fiammiferi cadono abbastanza spesso e si registrano parecchi incendi, mentre nel secondo cadono più raramente e gli incendi scoppiano più di rado. Ciò che succede in questo secondo caso è assai istruttivo: poiché non vi sono molti incendi a distruggerli, gli alberi diventano sempre più fitti. Quando vennero piantati duemila alberi per ogni fiammifero, fece in tempo a riempirsi l'intera griglia prima che scoppiasse un incendio, ma appena le prime fiamme cominciarono a divampare, il risultato fu tanto catastrofico quanto inevitabile: una singola pianta appiccò un incendio che si propagò all'intera foresta. In poche parole, quando la frequenza degli incendi era molto bassa, il modello mostrava la spiccata tendenza alle dimensioni catastrofiche.

Malamud, Morein e Turcotte lo definirono «effetto Yellowstone»; e forse tale effetto spiega perché il ministero americano della Gestione del territorio abbia riconosciuto che, nonostante concertati sforzi per domare i roghi spontanei, negli ultimi anni gli incendi inestinguibili sono divenuti più gravi e incontrollabili. Dal 1890 in avanti, il Servizio forestale degli Stati Uniti adottò la «tolleranza zero» anche per i roghi spontanei, cercando di spegnere sul nascere qualunque tipo di fiamma. È una politica che, nel mondo reale, equivale a gettare i fiammiferi virtuali molto meno spesso; e pare abbia avuto conseguenze analoghe.

Uno degli effetti involontari della tolleranza zero fu che le foreste cominciarono a invecchiare.[5] I vecchi alberi non furono sostituiti dai nuovi e l'evoluzione naturale dei materiali mutò. La legna secca, l'erba, i rametti, il sottobosco, la corteccia e le foglie si accumularono, sicché le foreste si allontanarono dallo stato critico naturale; gli incendi, infatti, sono una componente indispensabile della dinamica della natura. Quando il Servizio forestale cominciò sistematicamente a prevenirli e combatterli, le foreste furono spinte in uno stato ancora più instabile, che potremmo definire supercritico: vi era dappertutto un'alta densità di materiale combustibile. Come ha osservato un esperto del settore, Madre Natura ha nascosto nella foresta «l'equivalente di un meccanismo da giorno del giudizio». «Nei boschi protetti gli alberi, i rami (ritti o ca-

duti), l'erba e il sottobosco secchi e infiammabili si sono accumulati a tal punto ... che, colpendo un simile carico di combustibile, un solo fulmine o una sola cicca di sigaretta potrebbero provocare un incendio gigantesco.»[6]

Oggi la US Federal Wildland Fire Policy riconosce che la politica seguita in passato ha peggiorato la situazione delle foreste americane:

> Gli incendi di tipo catastrofico ora minacciano centinaia di migliaia di ettari, soprattutto là dove i modelli spontanei di crescita e morte della vegetazione sono stati alterati dalle trascorse pratiche di sfruttamento della terra e da un secolo di prevenzione degli incendi. Quando il carico di materiale combustibile supera le condizioni storiche, è possibile che si registri un deterioramento ecologico grave e potenzialmente permanente.[7]

Perciò adesso i funzionari forestali non cercano più di prevenire e domare gli incendi piccoli e medi, ma anzi, appiccano fuochi controllati per impedire al combustibile di accumularsi. Gli incendi di dimensioni medie servono a eliminare parte della legna secca pericolosa. Seguendo in certo modo lo stesso principio della simulazione al computer, riducono il numero di vie attraverso le quali l'incendio può diffondersi e rendono così più improbabile che una piccola perturbazione scateni una catastrofe.

La US Federal Wildland Fire Policy ha, forse senza volere, colpito nel segno quando ha concluso che «l'incendio boschivo, in quanto processo critico naturale, va reintrodotto nell'ecosistema». Forse occorreranno anni per ristabilire l'equilibrio e anche dopo quegli anni gli incendi catastrofici continueranno a scoppiare con discreta frequenza; dopotutto, sono un fenomeno inevitabile dello stato critico. Ma se non altro scoppieranno meno di quanto non farebbero in uno stato supercritico.

Assieme al principio di universalità, il modello di Malamud mostra che, in sostanza, la propagazione degli incendi boschivi non è legata a fattori specifici. La foresta pare un eccellente esempio di criticità autorganizzata: quello che conta, in essa, non sono le componenti complesse, ma la geometria semplice ed essenziale che regola la diffusione delle influenze.

Criticità, invarianza, relatività

All'inizio del ventesimo secolo, diversi filosofi si convinsero che la teoria della relatività di Einstein dimostrava come, in qualsivoglia settore, la verità dipendesse fondamentalmente dall'ottica scelta. Paradossalmente, Einstein riteneva che la sua teoria enunciasse proprio il contrario: essa si basa infatti sull'idea di invarianza, cioè su una concezione profonda della realtà che resta sostanzialmente la stessa al variare delle prospettive. La criticità autorganizzata condivide la basilare nozione di invarianza e proprio in questo sta la sua forza: è un'interpretazione dell'andamento dei fenomeni che si conserva vera su molte scale, a prescindere dalle miriadi di varianti riguardanti le molecole, gli alberi e gli altri oggetti, quali che siano, presi in esame.

Nell'America nordoccidentale, oltre trecento specie di cavallette mangiano l'erba delle praterie. Nessun insetto saltatore consuma una così grande quantità di vegetazione. In un anno, per esempio, divorano mediamente il 20per cento di tutte le foglie disponibili e, così facendo, hanno una notevole influenza sull'ecologia della prateria. Di norma tutto ciò è utile, perché mangiando erba le cavallette favoriscono il ciclo delle sostanze nutritizie nel suolo e la stabilità delle comunità vegetali; ma a volte diventano così numerose da uscire dal controllo. Nel 1983 e 1984, nella regione delle Black Hills, nel Wyoming, aumentarono fin quasi a soffocare la prateria. Da più di un secolo le autorità cercano di prevedere e prevenire simili invasioni in tutto l'Ovest americano, perché gli allevatori hanno bisogno delle praterie per il pascolo; ma non è certo facile capire che cosa produca simili eventi drammatici e incontrollati. Gli ecologi reputano che a determinare la variazione nel numero annuale delle cavallette siano oltre ventimila fattori, tra cui l'andamento delle temperature e delle precipitazioni stagionali e la popolazione dei numerosi predatori e parassiti di questi insetti.

Nel 1994, però, Dale e Jeffrey Lockwood, due fratelli entrambi ecologi, studiarono le invasioni con maggior rigore matematico di quanto non si fosse fatto in precedenza e rile-

varono un dato che a questo punto non può più sorprenderci. In diverse regioni dell'Idaho, del Montana e del Wyoming, da oltre mezzo secolo il ministero americano dell'Agricoltura calcola anno per anno l'area totale in cui il numero di cavallette ha superato la «capacità biologica», cioè la soglia di sostenibilità. In sostanza, quando esse superano in densità tale valore (circa otto al metro quadrato), con l'attività di un solo anno lasciano cicatrici durevoli nella struttura della comunità vegetale del luogo. L'area interessata dal superamento della soglia rappresenta una buona spia delle dimensioni dell'infestazione. Analizzando i dati statistici sulle invasioni in diverse regioni, i ricercatori hanno rilevato una distribuzione conforme a una legge della potenza: se le piccole infestazioni sono comuni, quelle grandi sono rare. Ma soprattutto, sotto il profilo della causa, non emerge una distinzione importante tra i due tipi di invasione. La legge della potenza lascia pensare che l'origine apparentemente insignificante di una piccola infestazione sia la stessa che in un'altra circostanza determina un'invasione devastante, e autorizza a credere che l'analisi delle condizioni locali all'inizio del fenomeno non serva assolutamente a valutare quale diventerà la dimensione finale.[8]

Tale scoperta potrebbe insegnare, riguardo al controllo dei parassiti, una lezione analoga a quella che si è appresa riguardo agli incendi boschivi. Ci informa infatti che, se anche controllassero perfettamente tutti i ventimila fattori, gli ecologi non formulerebbero per questo migliori previsioni. Forse le grandi invasioni sono inevitabili e basta, perché la densa rete di interazioni tra organismi e influenze fisiche è in uno stato critico e quindi costantemente sull'orlo di un cambiamento drammatico; cercare di prevedere l'infestazione successiva è, con tutta probabilità, assurdo. Può anche darsi, però, che, come nel caso degli incendi, gli sforzi compiuti in passato per prevenire e controllare le invasioni siano stati inopportuni, nel senso che sono serviti solo ad aumentare le probabilità di un'infestazione catastrofica.

Un andamento analogo si osserva anche in altri fenomeni. Nel 1996 due ricercatori dell'università di Oxford, Roy Anderson e Chris Rhodes, studiarono le epidemie di morbillo scop-

piate dal 1912 al 1969 tra gli abitanti delle Isole Fær Øer, che si trovano nell'Atlantico del nord tra l'Islanda e la Norvegia e sono abbastanza isolate dal resto del mondo. Scoprirono che, quanto a dimensioni (numero di persone contagiate), la distribuzione delle epidemie seguiva chiaramente una legge della potenza simile a quella dei terremoti o degli incendi boschivi. Quando, nel modello dell'incendio, si sostituirono gli alberi con le persone e il fuoco con l'infezione e si condussero ripetute simulazioni, si riscontrò una perfetta corrispondenza con le osservazioni.[9] Ancora una volta i particolari risultavano di scarso rilievo. Un modello che era stato elaborato per spiegare la diffusione degli incendi boschivi e che la spiegava benissimo risultava altrettanto adatto a descrivere la diffusione delle malattie in determinate popolazioni umane. Quando agli alberi si sostituiscono persone e all'incendio una malattia, le perturbazioni si propagano nello stesso identico modo.

Forse lo stato critico spiega pure il funzionamento di alcuni dei più strani oggetti dell'universo. Le pulsar sono stelle incredibilmente dense composte di neutroni: un cucchiaino della materia da cui sono costituite peserebbe molto più del più alto grattacielo del mondo. Sono anche fari astronomici, perché ruotando emettono un fascio di onde radio che gli astronomi sulla terra captano come impulsi periodici. Ogni tanto, però, il periodo di pulsazione aumenta di colpo, come se la stella avesse cominciato a ruotare più in fretta, e tali variazioni sono chiamate *glitch.*

Alcuni glitch sono più accentuati di altri, cioè denotano un maggiore aumento del periodo di rotazione. Nel 1993 due fisici dell'università del Texas a Austin studiarono i dati relativi a un ventennio e scoprirono che la distribuzione dei glitch seguiva una perfetta legge della potenza invariante di scala, e che i glitch minimi erano più frequenti dei grandi.[10] A che si deve il fenomeno? Essi formularono un'ipotesi: poiché la materia nucleare pura da cui è composta una pulsar è estremamente densa, la superficie della stella è sottoposta a una gravità spaventosa, la quale cerca di comprimere ancora di più il corpo celeste. Si potrebbe paragonare tale gravità alla forza che esercita su una faglia lo spostamento delle placche conti-

nentali. La superficie della pulsar perlopiù resiste al collasso come la crosta terrestre resiste allo slittamento, ma ogni tanto cede.

Durante questo «sisma siderale», i neutroni si organizzano in una palla un poco più piccola e densa, come una pattinatrice che per ruotare più in fretta tenesse le braccia strette al corpo, per cui la stella comincia a ruotare più veloce. Se l'idea fosse corretta, la legge della potenza relativa ai glitch risulterebbe una versione della legge di Gutenberg-Richter applicata ai neutroni delle pulsar.

Negli anni Novanta i fisici scoprirono le impronte della criticità autorganizzata in fenomeni disparati come l'accartocciamento della carta, il movimento dei campi magnetici in un superconduttore, l'aumento ciclico di attività solare associato alle macchie e perfino gli ingorghi del traffico. E si potrebbero facilmente moltiplicare gli esempi. La criticità interessa i sistemi più diversi a prescindere dalla loro composizione e dalla loro fisica specifica. In un certo senso l'organizzazione dello stato critico è più fondamentale della stessa fisica: le sta infatti a monte e pare lo spirito ordinatore di gran parte del mondo.

Chicchi di riso al posto della sabbia

Certo, la criticità non governa il mondo intero. Una vasca d'acqua fredda non è in uno stato critico, né lo è un magnete o un qualsiasi altro oggetto nella maggior parte delle situazioni. Del resto, Bak, Tang e Weisenfeld non insinuarono mai che tutto si trovasse in uno stato critico; speravano solo che la criticità autorganizzata descrivesse molti fenomeni, soprattutto di non equilibrio. Una vasca d'acqua è in stato di riposo ed equilibrio, mentre la continua pioggia di granelli mantiene il mucchietto di sabbia in uno stato critico. Analogamente, il calore interno della terra induce le placche continentali a spostarsi incessantemente sulla superficie terrestre mantenendo la crosta in condizioni critiche.

Anche all'interno del non equilibrio è facile trovare sistemi che non sono in uno stato critico. Se si scalda dell'acqua sul fornello tenendo alta la fiamma, l'acqua esploderà in un movi-

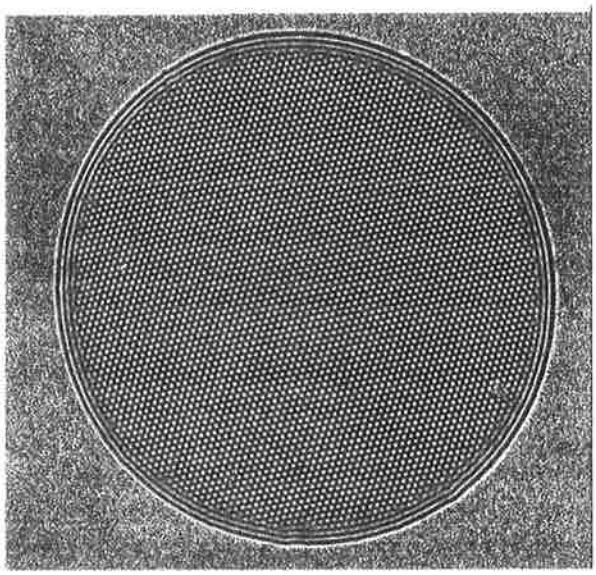


Figura 10. Configurazione esagonale delle celle di convezione nell'esperimento Rayleigh-Bénard. Visto dall'alto, il liquido fluisce in giù nelle regioni scure e in su nelle chiare. (Per gentile concessione di Eberhard Bodenschatz, della Cornell University.)

mento che non è né irregolare né imprevedibile e che non segue una legge della potenza. Se si conduce l'esperimento come lo condusse nel 1900 il fisico francese Henri Bénard, si noterà la configurazione perfettamente esagonale delle celle di convezione (*figura 10*), con l'acqua che all'interno di ciascuna di esse fluisce in su al centro e in giù ai bordi. Se alcuni sistemi si autorganizzano nello stato critico, non tutti lo fanno, nemmeno quando si trovano in condizioni di non equilibrio.

Che cos'è allora la criticità autorganizzata? In quali situazioni si presenta e in quali no? Ricordiamoci che Bak, Tang e Weisenfeld non avevano studiato un mucchietto di sabbia vero, ma virtuale: una simulazione al computer equivalente a un gioco. E nei primi anni Novanta alcuni fisici che stavano conducendo esperimenti di controllo sul terreno notarono un fenomeno a prima vista deludente: nei veri mucchi di sabbia le valanghe non seguivano una vera legge della potenza. La sabbia del mondo reale funziona più come il parco di Yellowstone che come i granelli computerizzati; mostra un'innata ten-

denza a valanghe catastrofiche. Dunque se la criticità autorganizzata vale per le stelle di neutroni, la crosta terrestre, le epidemie e la propagazione degli incendi nella maggior parte delle foreste, paradossalmente non vale per l'ambiente in cui fu osservata per la prima volta: il vero mucchietto di sabbia. Il modello matematico di Bak e colleghi si organizzava nello stato critico, ma i veri mucchi di sabbia non lo fanno.

Questa scoperta ci fornisce un primo indizio sul reale funzionamento dell'autorganizzazione critica e sugli sviluppi che possiamo aspettarci. Nel 1995 Kim Christensen e i suoi colleghi dell'Imperial College di Londra scoprirono che, se il modello computerizzato non descriveva mucchi di vera sabbia, descriveva però mucchietti crescenti di vero riso. Nel loro esperimento lasciarono cadere uno alla volta dei chicchi di riso nello spazio tra due lastre verticali di plexiglas e scoprirono, relativamente alla distribuzione delle valanghe, una legge della potenza quasi perfetta.[11]

Inoltre riuscirono a fornire una spettacolare dimostrazione della singolare velocità di variazione di un sistema nello stato critico. Durante l'esperimento del riso, per calcolare quanti chicchi scivolassero in ciascun momento, fotografarono il mucchio e contarono i chicchi a mano. I risultati evidenziarono una velocità di variazione totalmente irregolare e imprevedibile (*figura 11*). Vi sono lunghi periodi di calma interrotti da episodi così turbolenti da potersi definire vere e proprie catastrofi. Sarebbe estremamente interessante chiedersi, per ciascun chicco coinvolto nel fenomeno, che cosa abbia prodotto l'evento catastrofico.

Perché dunque il riso si autorganizza nello stato critico e la sabbia no? La risposta è connessa all'inerzia. I granelli di sabbia sono relativamente pesanti e scivolosi; quando cominciano a rotolare giù, continuano a farlo e producono il crollo dell'intero mucchio. I chicchi di riso, invece, sono relativamente leggeri e viscosi, sicché, quando cominciano a rotolare giù, rotolano solo finché il mucchio raggiunge una configurazione sufficientemente stabile, poi si fermano. Nel modello del mucchietto di sabbia, Bak, Tang e Weisenfeld avevano simulato granelli viscosi e quasi privi di inerzia, sicché somigliavano molto più al riso

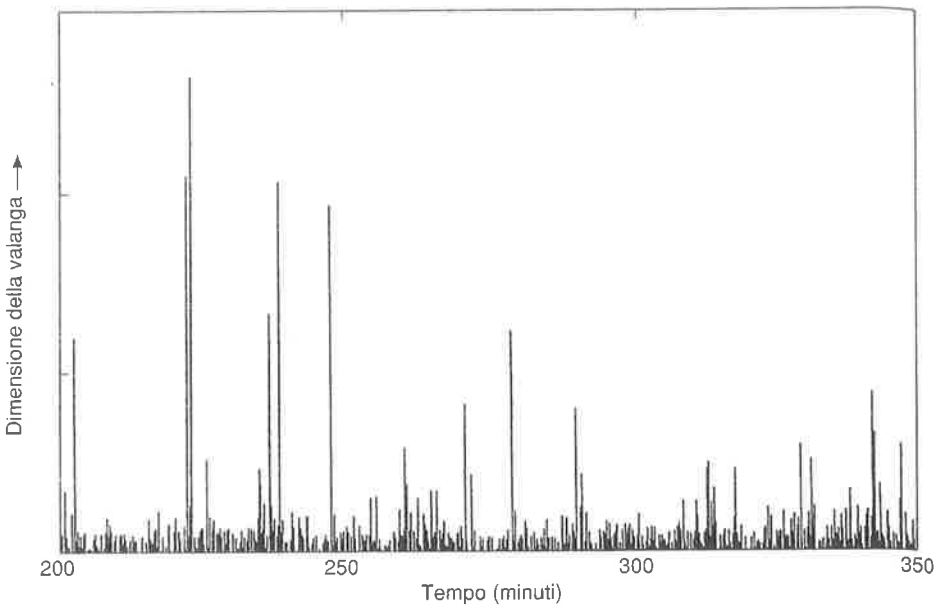


Figura 11. Grafico delle valanghe sporadiche e imprevedibili nell'esperimento del mucchietto di riso. L'altezza di ciascun picco indica la «dimensione» della valanga provocata dalla caduta di un singolo chicco. Più specificamente, l'altezza di ciascun picco è proporzionale alla perdita totale di altezza di tutti i chicchi coinvolti in quella valanga e quindi riflette non solo il numero di chicchi rotolati giù, ma anche la distanza a cui sono giunti rotolando. (Immagine tratta da V. Frette et al., *Avalanche dynamics in a pile of rice*, «Nature», 1996, 379, pp. 49-52. Riproduzione autorizzata.)

che alla sabbia. Il «modello del mucchietto di sabbia» avrebbe dovuto essere chiamato «modello del mucchietto di riso».

È chiaro quindi come una lieve modifica degli oggetti che vengono lasciati cadere possa significare la differenza tra lo stato critico e un altro stato. Lo stesso discorso vale per la velocità a cui cadono i granelli o i chicchi. Nel 1994 il fisico Geoff Grinstein, della divisione ricerca dell'Ibm, notò che il modello del mucchietto di sabbia raggiungeva lo stato critico solo se i granelli piovevano molto lentamente: bisognava lasciarne cadere uno, aspettare che la valanga da esso provocata fosse finita e solo allora farne cadere un altro. Se si aumenta la frequenza, cioè se il granello successivo atterra prima che la valanga precedente sia terminata, l'organizzazione critica e la legge della potenza vengono meno.

Queste piccole differenze hanno alcune conseguenze importanti. Bak, Tang e Weisenfeld si erano stupiti che il loro modello si autorganizzasse nello stato critico senza bisogno di regolazione esterna. Ora, però, sembra che si siano lasciati trarre in inganno. I granelli devono piovere molto lentamente ed essere molto più viscosi che pesanti. Nella loro ricerca di un comportamento insolito, i tre fisici inconsciamente regolarono il modello in maniera da conferirgli le caratteristiche *ad hoc*. La criticità autorganizzata insorge quando un sistema viene allontanato pian piano dallo stato di equilibrio e quando le azioni del singolo componente sono dominate dalle interazioni che esso ha con gli altri.

L'avere, sia pure in ritardo, riconosciuto che nel modello del mucchietto di sabbia c'era l'influenza esterna inferse un duro colpo all'idea originaria dell'autorganizzazione critica. Nel libro *How Nature Works* (1996), per esempio, Bak scrisse che «perché il concetto di criticità autorganizzata potesse ritenersi una valida descrizione del mondo reale era essenziale l'idea di autorganizzazione; era essenziale, insomma, che, quando si cercava di allontanarlo dallo stato critico, il mucchietto vi tornasse».[12] Se per far funzionare il modello matematico occorre un intervento esterno, non è un problema, in quanto vi sono scienziati che possono intervenire; ma nel mondo reale come avviene una simile regolazione?

Al gioco del mucchietto fu inferto, sì, un colpo duro, ma non fatale. Quasi tutte le buone teorie hanno bisogno di un qualche aggiustamento per poter corrispondere maggiormente alla realtà. Le equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo comprendono c, la velocità della luce nel vuoto; l'equazione fondamentale della teoria dei quanti comprende h, la costante di Planck: le applicazioni di queste teorie al mondo reale comportano inevitabilmente un aggiustamento dovuto al fatto che vengono aggiunti a tali valori altri valori «regolabili», quali le masse di particelle come gli elettroni. La meccanica quantistica è considerata una teoria eccellente anche se prevede diciannove di questi numeri «regolabili». Se un modello semplice è in grado di spiegare molte cose regolandone solo due, tanto meglio.

Inoltre le ricerche successive hanno mostrato in che modo l'aggiustamento intervenga nel modello del mucchietto di sabbia e appurato che vi interviene in maniera abbastanza speciale: con una regolazione di tipo debole. A questo punto il discorso si fa abbastanza tecnico, ma forse vale la pena soffermarcisi sopra un attimo.

Le transizioni di fase di cui abbiamo parlato nell'ultimo capitolo riguardavano lo stato di equilibrio: in altre parole, gli oggetti e i fenomeni presi in esame erano mantenuti in equilibrio e adottavano ora l'una ora l'altra organizzazione secondo le condizioni prevalenti, per esempio la temperatura. Solo da poco i fisici hanno cominciato a studiare le transizioni di fase nei sistemi non in equilibrio, cioè sottoposti a persistenti influenze esterne; ed è naturalmente un campo assai più vasto, perché nel mondo la maggior parte delle cose non è in equilibrio.

I fisici Alessandro Vespignani, del Centro internazionale di fisica teorica Abdus Salam di Trieste, e Stefano Zapperi, dell'École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles di Parigi, hanno studiato i modelli del mucchietto di sabbia e dell'incendio boschivo come esempi di transizioni di fase nel non equilibrio e hanno scoperto che, quando elaborarono quei giochi, gli ideatori scelsero inconsciamente i parametri atti a porre i sistemi nello stato critico.[13] Nel modello del mucchietto di sabbia, per esempio, si potrebbero lasciar cadere granelli a molte velocità diverse, ma il sistema si autorganizza criticamente solo quando vengono fatti cadere con una frequenza assai inferiore a quella alla quale rotolano giù. Il rapporto tra frequenza della caduta e frequenza della valanga dev'essere regolato sullo zero perché si raggiunga la criticità.

Bisogna però dire che è forse più facile regolare il rapporto sullo zero che su qualsiasi altro numero. Per il magnete in situazione di equilibrio, il parametro di regolazione è la temperatura, che deve raggiungere esattamente i 770 °C; se la si altera del 10 per cento, si perde il punto critico. Nel caso invece di una cifra infinitesima come 0,0001, se la si modifica del 10 per cento o addirittura moltiplica per 2, 10 o 100, si ottiene sempre una cifra infinitesima; i modelli del mucchietto di sabbia e del-

l'incendio risultano molto meno dipendenti del magnete dalla regolazione.

Forse questo spiega perché la criticità autorganizzata sembri descrivere tanti fenomeni del mondo reale. Di fatto andrebbe chiamata criticità «cospicua». Qualunque ne sia il motivo, nei terremoti e nelle epidemie si verifica grossomodo la regolazione necessaria a determinare lo stato critico. Vedremo come gli stessi fattori di lento accumulo della tensione e di dominanza delle interazioni caratterizzino anche il funzionamento della scienza (il modo in cui le idee evolvono e cambiano) e della storia umana. Vedremo inoltre come, riflettendo sui limiti della criticità autorganizzata, gli scienziati abbiano scoperto un altro processo di autorganizzazione che è altrettanto semplice, se non di più, e che forse consente di comprendere il funzionamento di molti fenomeni all'apparenza ancora inesplicabili. Particolare importante, anche tale processo di autorganizzazione rivela un mondo ubiquamente sull'orlo dell'instabilità.

Prima di parlare di simili argomenti, però, analizziamo un altro, notevole esempio di fenomeno complesso che pare convivere con l'organizzazione critica: la vita sulla terra e le sue occasionali estinzioni catastrofiche.

VIII

Tempo di estinzioni

> È nella natura delle teorie che, una volta concepite, assimilino qualsiasi cosa come il nutrimento più adatto; e, dal momento in cui le partorite, si rafforzino in genere a ogni cosa che vedete, sentite, leggete, o capite.
>
> *Laurence Sterne*[1]

> Non esiste una scienza affrancata dalla filosofia; esiste soltanto una scienza il cui bagaglio filosofico viene caricato a bordo senza controllo.
>
> *Daniel Dennett*[2]

Hell Creek è un torrente che nasce dal lago artificiale di Fort Peck, nel Montana orientale, e che scorre placido, solitario e tortuoso tra le colline. Attraversa una regione di vasti spazi, praterie, distese erbose, ampie vallate punteggiate di pini e strane rocce contorte che brillano di sfumature arancione e porpora sotto il sole cocente. Fluisce tra rocce che, con i loro frastagliati affioramenti, tradiscono un passato di estati torride e secche, inverni gelidi, venti e piogge alleati nello scolpire lenti la terra. Ogni anno un nuovo, sottile strato roccioso si sedimenta, aggiungendosi al cumulo di testimonianze della storia geologica locale. Per più di un secolo i paleontologi hanno scavato in quella storia studiando i fossili e hanno rinvenuto le tracce di una delle stragi più misteriose mai perpetrate sul pianeta.

Per un paleontologo risalire alle ere passate significa penetrare sempre più a fondo negli strati di sedimento; a Hell Creek, invece, significa spostarsi a valle. Durante la passeggiata di una mattina si possono trovare facilmente reperti risa-

lenti a 10 milioni di anni fa.[3] Non molto lontano dal lago artificiale, gli strati più profondi si sedimentarono quasi 700 milioni di anni fa, quando le pianure americane erano coperte da un oceano vasto e poco profondo. Lì le rocce sono una tomba fossile ricca di molluschi e molte altre creature marine, mentre un poco più a monte risultano di alcuni milioni di anni più giovani: risalgono all'epoca in cui, ritiratosi il mare, il Montana era una lussureggiante terra di fiumi e foreste, e contengono denti, artigli, frammenti di materia vegetale, insomma tracce del mondo affascinante e selvaggio in cui il *Tyrannosaurus rex* combatteva battaglie epocali con il triceratopo, suo storico rivale. È il luogo più adatto del mondo per cercare le tracce del *Tyrannosaurus rex* e, anzi, solo lì sono stati rinvenuti scheletri interi. Risalendo ancora il torrente, però, lo scenario cambia: 65 milioni di anni fa il fatale tallone del destino schiacciò il fantastico paradiso dei dinosauri e i sedimenti rivelano l'improvviso, immane dramma dell'estinzione di massa. Al di sopra del limite KT, come lo chiamano i geologi e i paleontologi, tutte le tracce dei dinosauri e di migliaia di altre specie svaniscono.

La discontinuità dei fossili all'altezza del limite KT è talmente eclatante che i geologi ritengono definisca il passaggio da un periodo geologico, il Cretaceo (in tedesco *Kreide,* da cui la «k»), a quello successivo, il Terziario (da cui la «t»). La linea di demarcazione tra l'uno e l'altro, risalente, come s'è detto, a 65 milioni di anni fa, è visibile in migliaia di siti in tutto il mondo. In alcune località della Spagna settentrionale, per esempio, si osservano drammatiche tracce della morte delle ammoniti, molluschi dalla conchiglia a spirale che abbondarono nei mari per 339 milioni di anni prima della terrificante estinzione. Al di sotto del limite KT si trovano ovunque le ammoniti fossili, mentre al di sopra non se ne trova nessuna: 65 milioni di anni fa si consumò un'immane strage; nello spazio di quello che in termini geologici era un attimo, i dinosauri e il 75 per cento di tutte le altre specie si estinsero.[4]

Che cos'accadde? Riguardo ai dinosauri si sono fatte numerose ipotesi. Nel 1905 uno studioso osservò che «con un peso così grande a carico delle ossa doveva indubbiamente esserci

una scarsa vitalità, sicché non c'è da stupirsi se la famiglia ebbe vita breve».[5] Un altro mise in dubbio la vitalità sessuale di quei giganti, affermando che «le loro membra fortemente appesantite ricordavano la condizione degli eunuchi».[6] A seconda delle epoche, l'estinzione dei grandi rettili fu spiegata con molteplici congetture: si pensò che fossero diventati ciechi, che avidi mammiferi avessero divorato tutte le loro uova, che i vulcani li avessero annientati con un'esplosione, che il clima fosse divenuto di colpo troppo freddo, troppo caldo, troppo secco o troppo umido.[7] Certo, non si estinsero soltanto i dinosauri.

Ai convegni scientifici e sulle riviste specializzate del mondo intero, si continua a dibattere vivacemente sulla causa che determinò la scomparsa di gran parte delle creature viventi. Quasi ogni settimana vengono pubblicate «prove» a favore o contro questo o quello scenario.[8] Ovviamente nessuno sa con sicurezza che cosa successe, ma su un punto tutti gli scienziati concordano: qualunque causa abbia avuto, l'estinzione non fu un evento unico. Un attento esame della documentazione fossile mostra come catastrofi devastanti abbiano colpito la terra più volte e come l'estinzione del KT non sia stata neppure la più grave.

Molto sotto il KT, la roccia presenta un'altra linea di demarcazione funesta che risale a 250 milioni di anni fa. Anche in questo caso l'interruzione nell'accumulo di fossili è talmente netta che i geologi la usano per definire il passaggio dal Permiano al Triassico. Nel 1998 il geologo Samuel Bowring, del Massachusetts Institute of Technology, e i suoi colleghi calcolarono la durata di quell'estinzione e scoprirono che si protrasse per soli diecimila anni. Di primo acchito potrà sembrare un periodo lungo, ma in una storia degli organismi pluricellulari lunga 600 milioni di anni equivale a un istante. «Fu la più colossale estinzione di esseri viventi avvenuta negli ultimi 540 milioni di anni» hanno scritto Bowring e colleghi.[9] Scomparve il 95 per cento di tutte le specie degli oceani e della terra.

Catastrofi analoghe colpirono il pianeta 440, 365 e 210 milioni di anni fa; assieme ai cataclismi del KT e del Permiano, tali estinzioni rappresentano le «cinque grandi», che spiccano

fra tutte le altre come gli spaventosi terremoti del 1836, 1838, 1868, 1906 e 1989 spiccano nella storia sismologica dell'area di San Francisco. Charles Darwin scrisse nell'*Origine delle specie* che, alla luce della teoria evoluzionistica, «la vecchia opinione della completa distruzione di tutti gli abitanti della terra per opera di catastrofi in successivi periodi era stata generalmente abbandonata».[10] Tuttavia l'idea dei cataclismi non è affatto tramontata. Il tessuto della vita pare essere stabile e in lento mutamento, ma la documentazione storica ci dice che si tratta solo di apparenza. Le «cinque grandi» sono solo le estinzioni di massa più vistose, ma dall'analisi dei fossili risulta che tra l'una e l'altra ve ne furono parecchie di dimensioni inferiori. La storia biologica della terra è andata incontro a collassi tanto sporadici quanto catastrofici.

Certo, non tutte le estinzioni furono di massa. I biologi evolutivi valutano che sul pianeta si siano evoluti nel corso del tempo alcuni miliardi di specie. Oggi ne sono rimaste solo alcune decine di milioni; ciò significa che il 99 per cento di tutte quelle comparse sulla terra sono ormai estinte. L'estinzione è un evento talmente naturale nella storia evolutiva che, come ha osservato una volta qualcuno, «a occhio e croce tutto quanto è estinto». Si calcola che solo il 35 per cento delle specie sia perito durante gigantesche estinzioni di massa.

Le estinzioni fisiologiche o «di fondo» rappresentano quasi i due terzi del totale, ma non spiegano gli episodi catastrofici. Che cosa potrebbe aver causato gli incredibili quanto sporadici eccidi di cui troviamo testimonianza nelle rocce?

Cause di forza maggiore

Le compagnie assicurative usano l'espressione «cause di forza maggiore» per definire gli incidenti e i sinistri che non si potevano prevedere e che non sono imputabili a nessuno. Se un tornado gioca a frisbee con il tetto della nostra casa o un fulmine incenerisce la nostra Porsche nuova fiammante, siamo vittime delle «cause di forza maggiore». Venti di distruzione hanno purtroppo tirato dalla nostra parte e l'assicurazione paga, come pattuito.

Gli scienziati tendono a pensare che le estinzioni di massa, in questo senso contrapposte alle estinzioni normali, cioè «di routine», siano la conseguenza di un'analoga «forza maggiore». Tutti, per vivere, abbiamo bisogno di un ambiente stabile e accogliente. Ci occorrono ossigeno, giusta temperatura, acqua e cibo sufficienti, radiazioni non troppo intense e così via. Se qualcosa perturba molto l'ambiente, gli organismi viventi ne soffrono. Per gli scienziati, quindi, spiegare l'origine delle estinzioni di massa significa scoprire che cos'accadde di brutto all'ambiente e perché.

Innumerevoli possono essere i fattori perturbanti, ovviamente, ma due tipi di eventi, uno assai più violento dell'altro, hanno finito per essere ritenuti particolarmente importanti.

Nel 1980 un'équipe di scienziati guidata dal fisico Luis Alvarez, dell'università della California a Berkeley, ipotizzò che la gigantesca estinzione del KT fosse stata provocata da una perturbazione atmosferica globale dovuta alla terribile collisione tra la terra e un grande asteroide o cometa.[11] «Probabilmente del diametro di 10 chilometri» scrisse del bolide Walter Alvarez, uno degli scienziati di Berkeley, «viaggiava a decine di chilometri al secondo, e la sua energia cinetica aveva la capacità distruttrice di cento milioni di bombe all'idrogeno.»[12] La collisione polverizzò rocce, scavò un cratere profondo quaranta chilometri e lanciò nell'atmosfera e nello spazio un immenso volume di pietrisco e polvere finissima. Le particelle, ricadendo sul pianeta, abbrustolirono tutto fino a oltre mille chilometri dal luogo dell'impatto e la superficie terrestre «divenne un'enorme graticola che cosse, carbonizzò, bruciò, immolò tutti gli alberi e tutti gli animali che non erano al riparo di rocce o di tane ... Furono incendiate foreste intere e il globo terrestre fu attraversato da incendi di dimensioni continentali.»[13] Ma, sempre secondo l'ipotesi, il cataclisma preparò solo il terreno al vero killer. La polvere diffusasi nell'atmosfera superiore oscurò per mesi il sole, provocando una notte costante. Le piante si seccarono, gli erbivori morirono di fame, l'intera catena alimentare fu sconvolta fino a sgretolarsi come un castello di carte, e alla fine anche il più feroce carnivoro venne cancellato.

Per quanto possa apparire fantascientifica, l'ipotesi è suffragata da diverse prove. Innanzitutto gli scienziati hanno trovato nelle rocce del limite KT notevoli quantità di un elemento raro come l'iridio, e non solo in una, ma in oltre cento località di tutto il mondo. Subito dopo essersi formata, la terra era incandescente e allo stato fuso e gli elementi più pesanti precipitarono nel suo nucleo; tra questi vi era l'iridio, che per tal motivo si rinviene solo di rado nella crosta. Come mai, dunque, lo si trovò nello strato del KT? La probabile risposta è che gli asteroidi e le comete ne contengono parecchio: qualunque sia stato l'oggetto che colpì il pianeta, l'iridio in esso contenuto salì nell'atmosfera superiore, s'infiltrò in tutto il globo e poi ricadde, depositandosi nello strato del limite KT. I geologi hanno anche misurato il livello di altri elementi rari come il rutenio e il rodio, e la loro percentuale nel KT è risultata la stessa presente negli asteroidi e nelle comete.

Se non vi sembra abbastanza convincente, vi sono altre prove. Undici anni dopo che Alvarez e i suoi colleghi avevano formulato l'ipotesi della collisione, un'altra équipe di scienziati scoprì un cratere enorme nella penisola dello Yucatán, in Messico.[14] Si poteva stare sull'orlo del cratere di Chicxulub senza rendersi conto della sua esistenza, perché si trovava un chilometro e mezzo sotto la superficie. Però c'era, aveva un diametro di quasi 180 chilometri e nel 1992, quando si riuscì a stabilirne l'età, si scoprì che si era formato 65 milioni di anni prima.

Certo, l'ipotesi ha anche i suoi punti deboli. La stessa presenza del cratere testimonia che in passato vi fu una gigantesca collisione e i depositi di iridio, nonché altre prove, mostrano come le conseguenze fisiche di quell'evento si siano estese al mondo intero. Ma bastò, questo, a provocare un'estinzione di massa? Qualcuno ha osservato che, nella lunga relazione scritta nel 1980, Alvarez e la sua équipe «si concentrarono perlopiù sulle prove fisico-geologiche e i risultati fisici della collisione, mentre all'analisi delle conseguenze biologiche dedicarono solo mezza pagina».[15] Il motivo della «mezza pagina» è semplice: nessuno ha in realtà idea di che effetti avrebbe la collisione con un asteroide o una cometa sulla vita del pianeta.

È strano inoltre che alcune specie si siano estinte e altre siano rimaste invece illese. Come ammette Walter Alvarez: «Sopravvissero molti animali terrestri più piccoli, mammiferi compresi, oltre ai rettili come i coccodrilli e le tartarughe. Nessuno in realtà capisce perché questi animali siano sfuggiti all'estinzione».[16] Complica ulteriormente il quadro il fatto che altre tremende collisioni non siano parse danneggiare minimamente la fauna. Nel 1998 il geologo Ken Farley, del California Institute of Technology, scoprì, assieme ad altri ricercatori, prove che dimostravano come nella Siberia settentrionale si fosse formato un cratere di cento chilometri di diametro nello stesso periodo in cui, negli Stati Uniti, si era aperta una voragine di 85 chilometri all'imboccatura della Baia di Chesapeake. Entrambe le fosse furono prodotte 35 milioni di anni fa, quando, durante una pioggia di comete nel sistema solare, alcuni di quei corpi celesti caddero sulla terra; ma la documentazione mostra che la fauna non subì alcuna grave conseguenza all'epoca.[17]

Date simili contraddizioni, c'è chi non crede che i dinosauri si siano estinti a causa della collisione con un asteroide o una cometa. Qualcuno ha avanzato anche un'altra ipotesi. Qualche anno fa il geologo Leigh van Valen, dell'università di Chicago, osservò che i dinosauri non vivevano da soli sulla terra, che i mammiferi cominciarono a prosperare e moltiplicarsi alcune centinaia di migliaia d'anni prima del limite KT e che forse furono loro a «estromettere» i giganteschi rivali. Certi paleontologi ipotizzano che, nella lotta per il successo, i mammiferi siano stati favoriti da cambiamenti climatici, perché in quell'epoca agli habitat caldi e lussureggianti adatti ai dinosauri succedettero fresche foreste più adatte ai mammiferi. Forse il medesimo mutamento climatico provocò l'estinzione di molte altre specie e forse le estinzioni del KT non furono affatto dovute alla collisione con un corpo celeste...

Venti gelidi

E le altre estinzioni di massa, quelle di 210, 250, 365 e 40 milioni di anni fa? Nessuno ha ancora trovato enormi crateri

provocati da collisioni avvenute in quelle date. Magari saranno scoperti in futuro, ma per il momento i paleontologi sospettano che altri fattori, come improvvisi cambiamenti climatici, abbiano determinato la scomparsa di varie specie. Dice Steven Stanley della Johns Hopkins University: «Un dato molto semplice rende il mutamento climatico una causa generale probabile delle estinzioni di massa: la relativa facilità con cui le variazioni nella temperatura globale possono eliminare miriadi di specie».[18]

In effetti, tutte le specie sono adattate a un determinato clima, qualunque sia. Se per esempio diminuisce la temperatura, le specie dovranno o migrare verso l'equatore per ritrovare il clima di prima o adattarsi alle nuove condizioni. Alcune, però, non possono migrare, o perché la via è preclusa da montagne, grandi laghi o oceani, o perché vivono sugli alberi di foreste che non si estendono a sud. Se poi la temperatura calasse troppo rapidamente, certune potrebbero non adattarsi abbastanza in fretta e quindi estinguersi.

Di fatto, le temperature globali calarono bruscamente nel caso dell'estinzione del Permiano, che fu la più grande e avvenne 250 milioni di anni fa, in concomitanza con altri eventi sinistri. Innanzitutto il livello dei mari diminuì sensibilmente. Quando succede questo, gli oceani si ritirano dai continenti, lasciando esposte all'atmosfera vaste aree di piattaforma continentale. Le piattaforme contengono enormi quantitativi di materia organica, la quale, quando interagisce chimicamente con l'atmosfera, assorbe ingenti quantità di ossigeno. Secondo il paleontologo Paul Wignall, dell'università di Leeds, quell'interazione potrebbe aver fatto scendere il livello di ossigeno alla metà di quello attuale. «L'estinzione di massa del Permiano-Triassico fu forse dovuta a un'asfissia generale» conclude.[19]

Gli scienziati non sono ancora d'accordo su quale di quelle influenze sia stata la più importante o sul loro eventuale ruolo nelle altre estinzioni. Secondo alcuni paleontologi, le estinzioni di massa si dovettero a drammatici periodi di attività vulcanica durante i quali furono scagliate in cielo immani quantità di polvere; secondo altri, furono causate da gravi siccità

globali. Un elenco di tutte le ipotesi formulate riempirebbe pagine e pagine e forse ci indurrebbe a mettere in dubbio il legame tra congetture e realtà dei fatti. Che si prendano in esame le estinzioni di 65, 210 o 250 milioni di anni fa, un fatto è certo: sulla terra accadde qualcosa di insolito. Forse la temperatura o il livello dei mari aumentarono o diminuirono, forse i vulcani eruttarono e le radiazioni ultraviolette si fecero più intense: in pratica, noi possiamo soltanto immaginare le conseguenze di simili fattori sull'ecosistema globale, per cui non c'è da meravigliarsi se sono state prese in considerazione tante cause potenziali. Come ha osservato il paleontologo David Raup: «L'elenco delle probabili cause di estinzione non potrebbe essere semplicemente una lista dei pericoli che ci minacciano come individui?».[20]

Quasi tutti gli scienziati, però, convengono su un punto: le estinzioni di massa sono provocate da un miscuglio di perturbazioni e mutamenti che sconvolgono l'ambiente in cui vivono gli organismi. Ed è questo a renderle differenti dalle estinzioni fisiologiche o di fondo che si verificano in continuazione. Nei periodi normali domina il consueto meccanismo dell'evoluzione, che condanna all'oblio ora l'una ora l'altra specie. Ma tali periodi sono interrotti da influenze esterne. «È l'alternarsi dei regimi di estinzione di fondo e di massa a dar forma ai modelli evolutivi su grande scala nella storia della vita» ha osservato il paleontologo David Jablonski.[21] O, come hanno scritto Richard Leakey e Roger Lewin a proposito del modello di trasformazione degli ecosistemi del mondo:

> Quel modello include due fasi, e precisamente i periodi caratterizzati dall'estinzione di fondo, durante i quali le specie scompaiono a un ritmo lento; ed episodi ad alta incidenza di estinzione, che comprendono le principali crisi biotiche. Moltissimi biologi sono concordi nel ritenere che, nei periodi in cui prevale l'estinzione di fondo, la forza fondamentale sia la selezione naturale, nella quale la competizione ha effettivamente un ruolo importante.[22]

La maggior parte dei biologi non crede che l'evoluzione, di per sé, possa indurre le estinzioni catastrofiche. La selezione naturale sarebbe responsabile delle estinzioni fisiologiche, mentre occorrono fattori esterni perturbanti per innescare le

estinzioni di massa. Il quadro pare semplice e soddisfacente, eppure accusa una grossa pecca.

Dieci anni in biblioteca

Il paleontologo Jack Sepkoski, dell'università di Chicago, preferisce compiere ricerche in biblioteca anziché sul campo. Non riporta alla luce fossili, ma informazioni sui fossili scoperte in passato da altri. Quando era laureando a Harvard a metà anni Settanta, si propose di compilare un esaustivo catalogo comprendente le date di nascita e morte di gruppi di organismi, e a tal fine cominciò a riempire taccuini di dati raccolti da libri, relazioni scientifiche e conversazioni avute con amici e altri paleontologi.

Quando pensa all'evoluzione, la maggior parte della gente pensa alle specie. Sepkoski invece no. Nell'albero della vita i rami grossi cedono il posto a rami più sottili, da questi hanno origine i ramoscelli, da questi si dipartono altri rametti ancora più esili: le specie. Com'è giusto, i biologi hanno assegnato un nome alle varie categorie. Il genere è l'insieme di molte specie strettamente correlate, mentre la famiglia è un gruppo di generi correlati. Nel 1982 Sepkoski pubblicò la prima parte della sua ricerca: un imponente archivio che documentava la nascita e l'estinzione di molte migliaia di famiglie. Ma era solo una tappa sulla strada che aveva imboccato. Dopo aver raccolto dati per altri dieci anni, mise insieme il database di 40.000 diversi generi (tutti invertebrati marini) compresi in 5000 diverse famiglie (con circa otto generi per famiglia).

Scelse gli invertebrati marini, come le spugne e i coralli, perché rappresentavano la parte più consistente della documentazione fossile. E quando, nel 1993, terminò la ricerca, i paleontologi si trovarono di fronte un quadro imponente: come innumerevoli organismi avessero prosperato, per poi estinguersi, negli ultimi 600 milioni di anni.[23] L'impresa di Sepkoski ne incoraggiò altre e poco tempo dopo Michael Benton, un geologo dell'università di Bristol, completò un suo studio indipendente sulle epoche di nascita ed estinzione di 7000 famiglie e organismi sia marini sia terrestri.[24]

Prima di vedere che cosa ci abbiano rivelato quei ricchi archivi, conviene spiegare quanto sia difficile raccogliere tale genere di informazioni. *Ten Years in the library* (Dieci anni in biblioteca), la ricerca di Sepkoski, dà l'idea dell'immenso database messo insieme dal paleontologo, ma non degli spinosi problemi che sono costretti ad affrontare gli studiosi impegnati in simili lavori.[25] Uno dei problemi è la «forza d'attrazione del presente». Solo pochissimi degli organismi vissuti in qualsivoglia epoca si fossilizzano: la maggior parte dei cadaveri si disperde senza lasciare traccia. Dei corpi che si fossilizzano, però, quelli che subirono il processo nella storia recente hanno più probabilità di sopravvivere intatti fino al presente. Perciò la documentazione fossile è inevitabilmente «viziata» a favore del presente.

Inoltre vi è l'«effetto monografia». Se sono pochissimi i fossili che ci pervengono, sono ancora meno quelli che scopriamo, sicché diverse specie ci restano del tutto ignote. Di conseguenza, se un particolare periodo geologico viene studiato più di altri, la documentazione fossile relativa a quel periodo finirà per essere più abbondante e ci indurrà a credere che vi sia stata, all'epoca, un'improvvisa esplosione del numero delle specie. Vi sono inoltre varie altre difficoltà, una delle quali apparve così seccante a Sepkoski e Benton da indurli ad analizzare le estinzioni a livello di genere anziché di specie.

Per raccogliere più dati possibile sull'origine e la fine degli esseri viventi sarebbe ovviamente meglio studiare le specie, ma il carattere sparso della documentazione fossile costituisce un problema. Supponiamo di aver datato alcuni fossili di una specie e di accingerci a valutare quando avvenne l'estinzione. Per una stima approssimativa potremmo prendere in considerazione il più recente di tutti i nostri fossili; ma se i fossili fossero pochi, la stima avrebbe scarso valore. Nel 1982 i geologi Phil Signor e Jere Lipps, dell'università della California a Davis, osservarono che quando si hanno a disposizione pochi fossili è improbabile che uno di quei pochi risalga all'epoca dell'estinzione della specie. È molto più probabile che risalga al periodo intermedio tra l'origine e la fine, sicché, attribuendo erroneamente il fossile intermedio alla fase finale, si ten-

derà ad anticiparne parecchio l'estinzione. Meno sono i fossili, più elevato è l'errore. L'effetto Signor-Lipps, come viene chiamato, ha anche il suo contrario, che è definito scherzosamente Lipps-Signor e riguarda le stime in merito all'origine. Prendere come data di nascita il periodo del fossile più vecchio ci indurrà a posticipare la reale origine della specie in questione.

Riassumendo, l'effetto Signor-Lipps spinge a credere che una specie si sia originata più tardi ed estinta prima di quanto non abbia fatto. Per fortuna, più aumentano i fossili meno si corre il rischio di commettere errori. Ecco perché Sepkoski, e in seguito Benton, decisero di non studiare le specie, ma di analizzare ciò che stava a monte, cioè i generi e le famiglie. In tal modo potevano mettere insieme fossili di specie diverse e valutare con maggior precisione quando un determinato gruppo si fosse originato o estinto. Raccogliendo i dati, cercarono di correggere la «forza d'attrazione del presente», l'«effetto monografia» e altri fattori atti a viziare i risultati, in questo agendo come gli storici, che esaminano sempre i documenti *cum grano salis*, senza prenderli troppo alla lettera. È chiaro quindi che la documentazione messa insieme da Sepkoski e Benton rappresenta il quadro più completo elaborato finora sull'evoluzione degli organismi viventi nel pianeta.

Come ho spiegato, secondo la visione ortodossa le estinzioni furono di due tipi: quelle normali causate da comuni processi evolutivi e quelle di massa provocate da cambiamenti di clima, collisioni con asteroidi o altri eventi disastrosi per la biosfera. Un grafico dei dati raccolti da Sepkoski e Benton sembra suffragare l'ipotesi. Osservando la percentuale di famiglie estintesi in ciascun periodo geologico, si nota un andamento relativamente quieto interrotto da sconvolgimenti improvvisi (*figura 12*). Le estinzioni catastrofiche spiccano sulle altre, ma è un fenomeno di cui abbiamo già parlato; elaborare un grafico della frequenza di estinzioni piccole e grandi ci apre invece nuovi orizzonti.

Nel 1996 i fisici Ricard Sole e Susanna Manrubia analizzarono i dati raccolti da Sepkoski e scoprirono che la distribuzione delle estinzioni in base alla dimensione (definita dal numero di famiglie estintesi) seguiva, manco a dirlo, una legge della

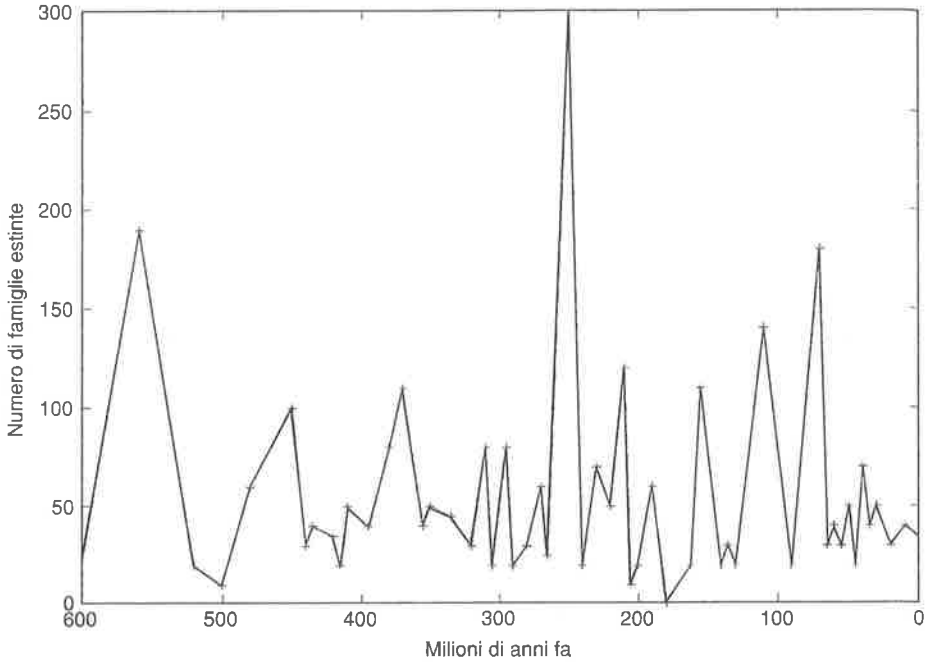


Figura 12. Il grafico delle estinzioni di massa. Ogni picco corrisponde al numero di famiglie che si estinsero in ciascuna era geologica. I cinque picchi più alti corrispondono alle cinque maggiori estinzioni di massa, l'ultima delle quali si consumò 65 milioni di anni fa e cancellò i dinosauri.

potenza. Anzi, in questo caso l'andamento è identico a quello dei sismi: al raddoppiare delle dimensioni, l'estinzione si fa quattro volte più rara. Tutte le estinzioni, da quelle in cui periscono solo poche famiglie a quelle in cui ne vengono cancellate migliaia, risultano seguire tale legge matematica.

I fenomeni turbolenti hanno forse cause turbolente? Le estinzioni catastrofiche devono per forza avere origini catastrofiche? Nei precedenti capitoli abbiamo visto come questo pregiudizio abbia perso mordente negli ultimi anni, per esempio nell'ambito dei terremoti e degli incendi boschivi. La forma molto semplice della curva delle estinzioni di massa fa pensare che gli scienziati si siano clamorosamente sbagliati quando hanno attribuito a tali drammatici episodi il carattere dell'eccezionalità. È senz'altro vero che, in una linea temporale che mostri quando avvennero le varie estinzioni e quanto

grandi furono, i picchi massimi saltano agli occhi e si tende perciò a considerarli eccezionali; ma, se descritta in diversa maniera, la stessa successione di fenomeni rivela come non vi sia nulla di trascendentale negli eventi catastrofici. Grazie alla prospettiva che la legge della potenza consente di assumere, si comprende che le estinzioni di massa non fanno eccezione alla logica evolutiva. Anziché l'impronta della mano celeste di Dio, sono forse il normale prodotto dei comuni principi evoluzionistici.

IX
La rete della vita

> Il primo dovere di una persona colta è di tenersi sempre pronta a riscrivere l'enciclopedia.
>
> *Umberto Eco*[1]

> Le cose andrebbero rese il più possibile semplici, ma non più semplici del possibile.
>
> *Albert Einstein*

Alla fine degli anni Settanta, nella verde campagna dell'Inghilterra meridionale si stava consumando una piccola catastrofe ecologica: orde di conigli stavano devastando centinaia di migliaia di ettari di fertile terra coltivata. Per fortuna il governo britannico trovò quasi subito una soluzione biologica facile e sicura. Il virus della mixomatosi prospera quasi esclusivamente nei conigli; non li uccide, ma li infiacchisce, col risultato che si riproducono meno e diventano più facili prede. Le autorità calcolarono che, introducendo la mixomatosi nella popolazione di conigli, avrebbero potuto tenerla sotto controllo con pochissimi effetti negativi per l'equilibrio ecologico della campagna. Ma naturalmente le cose non erano così semplici.

La mixomatosi ridusse, sì, il numero dei conigli nel giro di qualche anno, ma il prezzo del bestiame nel frattempo diminuì e tenere animali da pascolo divenne sempre meno conveniente per gli agricoltori. Poiché sempre meno bestie pascolavano e sempre meno conigli brucavano, nei campi inglesi del sud l'erba crebbe a dismisura. Di per sé non parrebbe un problema grave, ma vi è una formica, *Myrmica sabuleti*, che prospera nell'erba corta e non in quella alta, sicché presto la sua

popolazione fu decimata. Inoltre *Myrmica sabuleti* ha un rapporto peculiare con *Maculinea arion*, una grande farfalla azzurra. Quando la farfalla depone le uova, queste vengono portate dalle formiche nei loro cunicoli, dove sono covate fino alla schiusa e alla muta. Purtroppo, alla fine degli anni Settanta, la popolazione di *Maculinea arion* era già ai limiti della sopravvivenza e quando le formiche calarono sensibilmente, le farfalle persero ogni speranza. L'introduzione della mixomatosi, oltre a produrre erba più alta, ridusse il numero di formiche e cancellò dall'Inghilterra una bella farfalla azzurra.

Tali imprevedibili reazioni a catena non sono affatto insolite in natura. Per sondare la struttura di un ecosistema, gli ecologi spesso provano a rimuovere un determinato predatore, poi studiano gli effetti che la sua scomparsa ha avuto sulla sua principale preda. A prima vista si potrebbe credere che gli effetti siano prevedibili, cioè che eliminando il predatore il numero delle prede aumenti. Ma nel 1988 Peter Yodzis, dell'università di Guelph, in Canada, scoprì che così non era.[2] Nel corso di una ricerca condotta su tredici distinti ecosistemi, osservò come il numero e la complessità delle vie di collegamento indirette fra specie fossero talmente grandi che non si poteva prevedere nemmeno l'effetto della scomparsa di un predatore sulla sua preda naturale. Eliminare per esempio un certo uccello che mangia un certo topo può produrre alla fine una diminuzione anziché un aumento della popolazione dei topi. Se l'uccello mangiasse ancor più volentieri alcuni diretti concorrenti del topo, la sua assenza farebbe aumentare i concorrenti più dei topi e la popolazione dei topi ne soffrirebbe. Data questa rete di collegamenti indiretti, una variazione nel numero di organismi di una specie può avere diverse conseguenze impreviste anche in specie che non paiono per niente correlate.[3]

Un'indagine più recente e più vasta porta a conclusioni analoghe. Nella annuale ricerca statistica sulla riproduzione della popolazione aviaria del Nordamerica, si elabora una stima di oltre seicento specie di uccelli degli Stati Uniti e del Canada. L'analisi, che viene condotta da oltre trent'anni, fornisce molti dati sulle fluttuazioni che si registrano nelle popolazioni

delle varie specie. Nel 1998 l'ecologo Timothy Keitt, dell'università della California di Santa Barbara, e il fisico Gene Stanley, dell'università di Boston, si servirono del database per calcolare con che rapidità variasse la popolazione di ciascuna specie ogni anno: per esempio, un anno una poteva aumentare del 10 per cento e l'anno dopo diminuire del 15. Studiando le variazioni, condussero in campo aviario un'operazione analoga a quella che Gutenberg e Richter avevano condotto in campo sismologico: calcolarono in base alla documentazione le frequenze relative di ciascuna variazione per vedere se vi fossero un tasso di crescita e di diminuzione medi.

Quali tassi medi trovarono? Ebbene, non ne trovarono nessuno. Quando il cambiamento più probabile è la mancanza di cambiamento, le variazioni verso l'alto o verso il basso diventano progressivamente meno probabili e seguono entrambe la stessa legge della potenza. «Nelle specie esaminate» conclusero Keitt e Stanley «non vi è una scala caratteristica delle fluttuazioni delle dimensioni della popolazione.» In altre parole, la variazione futura è imprevedibile non solo quanto a direzione (verso l'alto o verso il basso), ma anche quanto a scala approssimativa di grandezza.

Chiaramente, si tratta della stessa invarianza di scala che abbiamo visto nello stato critico originato dalla transizione di fase di una sostanza. Anzi, quando commentarono la loro scoperta, Keitt e Stanley si riferirono direttamente alla fisica della transizione di fase, osservando che l'invarianza di scala nel punto critico

> emerge in questi sistemi inanimati perché ciascuna particella interagisce in maniera diretta con alcune particelle vicine e, quando queste interagiscono con le loro vicine, le interazioni si «propagano» per lunghe distanze, producendo distribuzioni regolate da una legge della potenza. Analogamente, le specie di un ecosistema interagiscono in maniera diretta con alcune (ma non tutte) le altre, le quali a loro volta interagiscono con altre, sicché le interazioni si «propagano».[4]

Se gli ecosistemi vivono in uno stato critico, è logico aspettarsi di vedere grandi sconvolgimenti e di trovare dappertutto distribuzioni indipendenti dalla scala. Ci si può quindi chiedere se tutto ciò non sia in qualche modo connesso con la leg-

ge della potenza per le estinzioni di massa di cui abbiamo parlato nel precedente capitolo; se, insomma, le estinzioni di massa non siano prodotte dal mero funzionamento interno dell'ecosistema. L'ipotesi è senza dubbio affascinante.

I dati di Keitt e Stanley, però, riguardano catene ecologiche di causa ed effetto, cioè popolazioni di specie diverse che interagendo tra loro possono condurre a sensibili alterazioni del numero degli organismi nell'arco di appena una o due generazioni. I biologi contrappongono queste rapide dinamiche ecologiche ai cambiamenti evolutivi che procedono assai più lentamente e diventano visibili solo nel corso di molte generazioni. L'evoluzione modifica non solo il numero, ma anche il carattere degli organismi, producendo becchi più lunghi, piume più brillanti o pinne caudali picchiettate. Poiché la documentazione fossile copre un arco di tempo lunghissimo, se si volessero spiegare le estinzioni di massa facendo riferimento al comune funzionamento interno dell'ecosistema si dovrebbero prendere in considerazione tanto i modelli ecologici quanto quelli evolutivi.

L'evoluzione può benissimo condurre all'estinzione. A mano a mano che le condizioni cambiano, una data specie magari non riesce più ad adattarsi. È facile immaginare allora che, siccome nessun organismo vive isolato, l'estinzione di una specie provochi quella di un'altra, la quale a sua volta determinerà l'estinzione di una terza, in una micidiale valanga che potrebbe «propagarsi» parecchio. Esistono prove a favore dell'ipotesi che le estinzioni-valanga siano in qualche modo connesse alle estinzioni di massa? La risposta, come vedremo, è affermativa. Molti scienziati sono giunti a sospettare che l'ecosistema globale sia organizzato nello stato critico non solo a livello ecologico, ma anche a livello evolutivo, e che l'estinzione di una sola specie provochi a volte una catastrofe che intacca l'intero sistema.

Colli e valli

Stuart Kauffman ha una laurea in medicina, un'impostazione mentale da fisico e un lavoro da biologo; ma non si occupa

del mondo microscopico, come definire la struttura di una proteina o la sequenza di un gene, bensì del mondo macroscopico. A metà anni Ottanta, all'università della Pennsylvania di Filadelfia dove insegna, avanzò una teoria completamente nuova in merito alle origini della vita sulla terra. Prima di allora tutti avevano ritenuto che la nascita della vita sul pianeta sia stato un evento del tutto improbabile. Molti miliardi di anni fa, si formò miracolosamente nel brodo primordiale il primo aggregato di molecole in grado di riprodursi; e una volta messosi in moto, il meccanismo evolutivo della «sopravvivenza differenziale di entità autoreplicanti» continuò a funzionare. Ma com'era iniziato? Le indagini indicavano incontrovertibilmente che dalla formazione dell'universo non c'era stato abbastanza tempo.

Kauffman cominciò a condurre semplici simulazioni matematiche nelle quali riproduceva l'interazione di molecole diverse sulla terra primordiale e fece una scoperta interessante: alcune molecole fungevano da catalizzatori, ovvero acceleravano le interazioni chimiche di altre. Le molecole di tipo A, per esempio, incrementavano parecchio la velocità alla quale le B e le C si aggregavano per creare le D. Egli studiò reti casuali di molecole interagenti e notò che se i tipi di molecole erano in numero ristretto, non si riscontrava nulla di eccezionale nella chimica del brodo, mentre se i tipi aumentavano di numero, nella rete si formava immancabilmente quello che definì «insieme autocatalitico», un sottoinsieme di molecole che rendono il sistema autonomo. La molecola A catalizza la produzione della D, la D catalizza per la E o la F, le quali a loro volta catalizzano per la C e la G, e così via. Alla fine di tutti questi passaggi, la Y e la Z catalizzano per la A e la B completando il concatenamento, sicché la produzione di ciascuna molecola viene catalizzata da un'altra.

Se si forma un tale anello di feedback positivo in una serie di molecole, la concentrazione di tutti i membri dell'insieme autocatalitico diventa molto alta. La straordinaria scoperta di Kauffman fu che gli anelli di feedback si formano regolarmente se i tipi di molecole nel brodo sono in numero sufficientemente elevato. Non è detto che tale numero debba essere

enorme. Come nel magnete del VI capitolo, in un brodo molecolare si ha una naturale transizione di fase – il passaggio dal comportamento statico al comportamento dinamico – appena i tipi di molecole aumentano di numero. E la transizione di fase del regno molecolare costituisce la base di una nuova teoria, secondo la quale l'origine della vita sarebbe non già improbabile, bensì inevitabile.

Affascinato dall'insolita prospettiva, dopo avere studiato come nasceva la vita Kauffman passò ad analizzare i ritmi biologici della vita già nata, ossia l'evoluzione nel complesso contesto degli ecosistemi. Si tratta senza dubbio di un problema assai intricato, perché l'ambiente in cui una specie evolve non è mai fisso. Le specie interagiscono (si divorano a vicenda, competono per il territorio, cooperano e così via); e quando una di esse evolve, modifica l'evoluzione delle altre. Per cercare di comprendere simili problemi, i biologi evolutivi dedicano molto tempo all'analisi dei paesaggi di fitness, cioè dei modelli matematici le cui superfici ondulate oggi, direttamente o indirettamente, ispirano le ipotesi più affascinanti sulla natura dell'evoluzione, non esclusa quella di Kauffman.

L'evoluzione persegue i suoi obiettivi attraverso la triplice azione della variabilità, della selezione e della riproduzione. In una popolazione di conigli, per esempio, alcuni individui vedono meglio, corrono più veloci e pensano più in fretta di altri: questa è la variabilità. Gli individui più idonei tendono a vivere più a lungo e a produrre più prole degli individui più deboli: questa è la selezione. Poiché i genitori passano copie dei loro geni alla prole, la successiva generazione, in conseguenza della riproduzione, comprenderà quasi sicuramente una percentuale di conigli idonei maggiore di quella precedente, per cui la fitness complessiva della popolazione aumenterà gradualmente.

Il concetto di paesaggio di fitness ci aiuta a visualizzare meglio i cambiamenti. Nel linguaggio tecnico della biologia il colore, la velocità, la forza, l'intelligenza e altre caratteristiche costituiscono il fenotipo di un organismo. E il fenotipo determina la fitness. Ora immaginiamo una griglia bidimensionale in cui ciascun punto corrisponda a un diverso fenotipo e im-

maginiamo un paesaggio ondulato – il paesaggio di fitness – nel quale l'altezza di un punto corrisponda a un dato individuo di ciascun fenotipo (*figura 13*): in altre parole, il paesaggio sale o scende a mano a mano che il fenotipo cambia.

Vista attraverso un simile modello matematico, l'evoluzione equivale all'ascesa o discesa di popolazioni per accidentati colli e valli. Alcuni conigli inidonei potrebbero apparire all'inizio come una nube di punti in una valle; certi verranno mangiati, altri si riprodurranno e dopo una generazione alla nube ne succederà un'altra. Generazione dopo generazione, una nube sostituirà un'altra nube e ogni volta, a causa del rimescolamento dei geni e delle mutazioni casuali, alcuni punti verranno spinti un poco più in basso o un poco più in alto di prima. Poiché gli individui più idonei generano più prole, la nube salirà su per la collina, fino a raggiungere la cima.

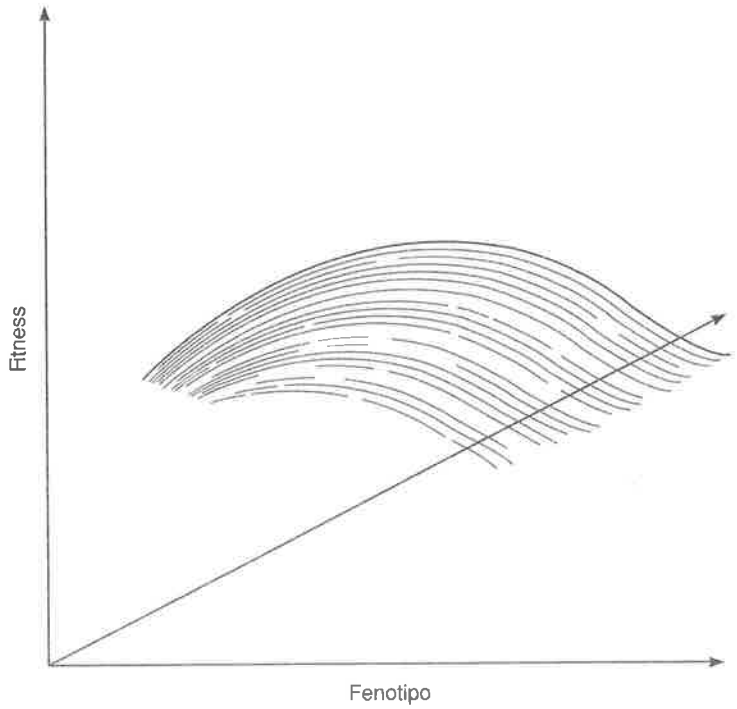


Figura 13. Un paesaggio di fitness con un unico picco.

Da quanto ho detto finora si direbbe che l'aspetto del paesaggio di fitness dipenda solo dall'organismo preso in esame, ma naturalmente dipende anche da molti altri fattori, come le condizioni climatiche e le caratteristiche di tutte le specie di alberi, uccelli e batteri con cui l'organismo interagisce. Poniamo che una popolazione di rane abiti un picco del proprio paesaggio di fitness: se nell'area comparisse all'improvviso un serpente abituato a nutrirsi di rane, il paesaggio adattativo degli anfibi muterebbe ed essi potrebbero ritrovarsi in fondo a una valle. Molti individui verrebbero mangiati dal serpente, ma la popolazione potrebbe evolversi, sviluppare la mimetizzazione e raggiungere un altro picco di fitness locale.

A causa dell'interazione, dunque, qualsiasi cambiamento evolutivo di una specie può indurre cambiamenti evolutivi in un'altra. Partendo da tale premessa teorica, Kauffman si chiese se la coevoluzione producesse effetti interessanti. Purtroppo gli ecosistemi sono talmente interconnessi che nessuno è in grado di capire come sarebbe, per una specie, un paesaggio di fitness nel mondo reale. Nel VI capitolo, però, abbiamo visto che il funzionamento delle calamite di ferro si poteva comprendere studiando, anziché l'oggetto reale, dei modelli assai semplificati, insomma delle simulazioni al computer. Grazie alle classi di universalità, tali modelli ci hanno fornito alla fine un quadro molto preciso di che cos'accade nella realtà nel punto critico tra due fasi.

Stuart Kauffman e il suo collega Sonke Johnsen decisero di adottare un metodo analogo nell'analisi della coevoluzione.

Specie digitali

Per semplificare le cose, rappresentarono le specie come serie di 0 e 1; poi ordinarono al computer di seguire lo sviluppo dei paesaggi adattativi di un certo numero di specie e di controllare di volta in volta le posizioni da esse raggiunte. Fecero però in modo che il paesaggio riflettesse alcune caratteristiche dei paesaggi di fitness veri, e in particolare che abbondasse di «cime» e «valli». Lasciarono inoltre interagire le specie in maniera che, sia pur elementarmente, il cambiamento evolutivo

dell'una influisse sul paesaggio adattativo dell'altra. Organizzarono in sostanza il modello secondo la logica coevolutiva, anche se mancava la maggior parte delle caratteristiche reali; poi studiarono che cos'accadeva.

In un primo tempo non successe nulla di particolarmente interessante. Le specie evolsero fino a raggiungere picchi di fitness: tutto lì, senz'alcun cambiamento di rilievo. Lo scenario era assai noioso, ma appena si familiarizzarono meglio con il gioco, Kauffman e Johnsen si accorsero che, se regolavano l'ecosistema in maniera da rendere più accidentati i paesaggi, l'evoluzione diventava assai più attiva e vigorosa. Quando i paesaggi di ciascuna specie erano aspri, sì, ma non troppo, e quando l'influenza di una specie sul paesaggio dell'altra era calibrata al punto giusto, l'ecosistema funzionava come il modello del mucchietto di sabbia. Un cambiamento evolutivo in una singola specie poteva scatenare una valanga coevolutiva capace di influire su più specie o addirittura su tutte quelle dell'ecosistema.[5]

Conducendo numerose simulazioni, i due ricercatori scoprirono che il rapporto fra le dimensioni delle valanghe coevolutive e il numero delle specie seguiva una legge della potenza. In altri termini, nell'ecosistema Kauffman-Johnsen, perlomeno quando si effettuano determinate regolazioni, gli eventi non hanno una dimensione tipica. Quando una specie evolve, può evolvere da sola oppure indurre un milione di altre a seguire il suo esempio. Inoltre l'andamento degli eventi evolutivi ricorda molto quello delle estinzioni di massa: lunghi intervalli di apparente quiete interrotti da improvvisi scoppi di attività. Come Fermi con il suo reattore, Kauffman e Johnsen avevano regolato l'ecosistema sul punto critico.

Certo, il modello presenta una visione della coevoluzione che è alquanto semplificata rispetto a quella reale. Tuttavia il principio di universalità ci dice che ogniqualvolta ci troviamo davanti a un sistema organizzato nello stato critico, la maggior parte delle caratteristiche specifiche non ha alcuna importanza. Nel 1993, quasi a confermare l'assunto, Per Bak e Kim Sneppen, che allora lavoravano all'Istituto Niels Bohr di Copenaghen, elaborarono un modello coevolutivo ancora più

semplice, che conduce quasi allo stesso risultato. Vale la pena analizzarlo più da vicino perché è forse la più elementare struttura coevolutiva che si possa immaginare. Per capire come sia stato concepito bisogna considerare più attentamente la natura dell'evoluzione dei paesaggi adattativi: la storia, infatti, non consiste solo nel salire sulle colline.

I paesaggi reali sono in certo grado accidentati, con vette di varie altezze che si alternano a valli, e i paesaggi di fitness non sono diversi. Perciò è improbabile che una popolazione che procede in salita riesca ad arrivare al picco più alto; è assai più probabile che raggiunga uno degli innumerevoli picchi bassi e che vi si fermi, come farebbe qualunque rocciatore tentasse di scalare un'aspra montagna senza una mappa. Una volta lassù, per salire più in alto la specie dovrebbe spiccare un balzo verso il più vicino picco superiore. Quanto tempo impiega una specie a compiere un simile balzo?

Per raggiungere l'obiettivo alcuni membri della popolazione dovrebbero attraversare la «valle della morte» di fitness inferiore posta tra le due vette. A ogni generazione la nube di punti produrrà nella valle alcune nuove nubi o varianti. Avendo fitness inferiore, le famiglie di queste varianti sopravvivranno solo per una o due generazioni. In qualche rara occasione, però, una famiglia potrà durare quattro, sette o perfino dieci generazioni. In una di queste occasioni, una serie di eventi genetici rarissimi, uno per generazione, condurrà alcune varianti di là dalla valle e farà approdare un discendente nella Terra Promessa posta alle pendici della vicina collina. Moltiplicandosi e arrampicandosi, il discendente e la sua prole porteranno allora la popolazione in su, verso un picco più alto di quello di partenza (*figura 14*). Secondo la teoria evoluzionistica, il tempo occorrente per compiere tale salto aumenta in misura proporzionale alla distanza del picco successivo.[6]

In altre parole, se una specie si trova davanti a un salto breve potrà raggiungere il picco più alto in un tempo ragionevole, mentre se si trova davanti a un salto lungo resterà bloccata sul proprio picco per eoni. Bak e Sneppen sfruttarono questo principio abilmente. Dopo aver cominciato a salire sulle colline, ragionarono, ciascuna specie si sarebbe fermata su una

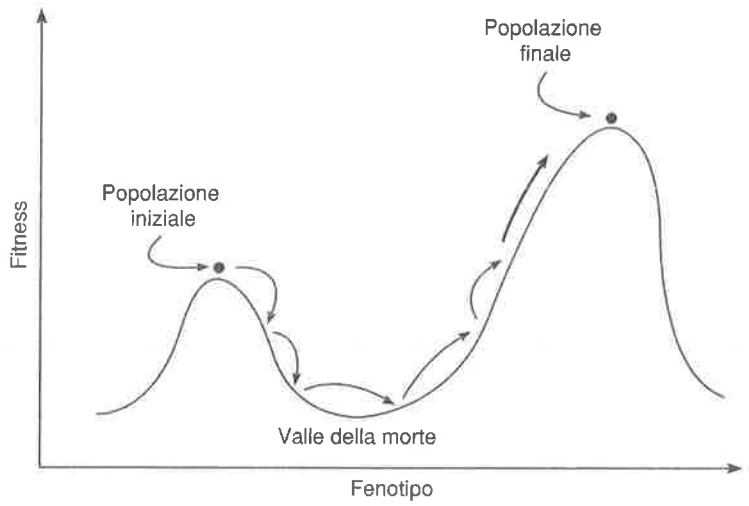


Figura 14. Una popolazione che si trova su un picco di fitness può raggiungere un picco più alto solo tramite una mutazione che la porti ad attraversare la «valle della morte» di fitness inferiore esistente tra un picco e l'altro.

vetta locale e non avrebbe avuto modo di spostarsi su una più alta a causa della gola esistente tra le due. L'ampiezza della gola rivela quanto sia difficile per quella specie evolversi ancora e quanto tempo le occorrerà per farlo. L'ampiezza delle gole, una per ciascuna specie, è decisiva, perché non può accadere nulla finché qualcuno non compie un salto. Perciò Bak e Sneppen si concentrarono esclusivamente su quei dati e ignorarono tutto il resto.

Aste e cunei

Per vedere la condizione di un ecosistema con gli occhi dei due ricercatori, proviamo a immaginare una serie di aste di lunghezza pari all'ampiezza delle varie gole cui si trovano di fronte le specie. Spingendosi ancora più in là nell'astrazione, Bak e Sneppen assunsero che la lunghezza delle aste fosse compresa solo tra 0 e 1. L'ecosistema evolve in base a due regole. Poiché i balzi brevi sono enormemente più probabili dei balzi lunghi, la prima specie a saltare è quasi sempre quella che ha di fronte la gola più stretta; quando compie il balzo, ta-

le specie si ritroverà su un nuovo picco e avrà davanti una nuova gola che potrà essere tanto ampia quanto stretta. La regola numero uno è quindi: trovare la specie dall'asta più corta e sostituirla con un'altra di lunghezza casuale compresa tra 0 e 1 (*figura 15*). Tale regola definisce l'evoluzione spontanea delle specie.

«Coevoluzione» significa in sostanza che le specie interagiscono e, per semplificare, Bak e Sneppen postularono che ognuna interagisse con le due contigue. Quando evolve, una specie perturba i paesaggi di fitness di quelle più vicine: dopo essere state sui picchi, esse se ne ritrovano all'improvviso lon-

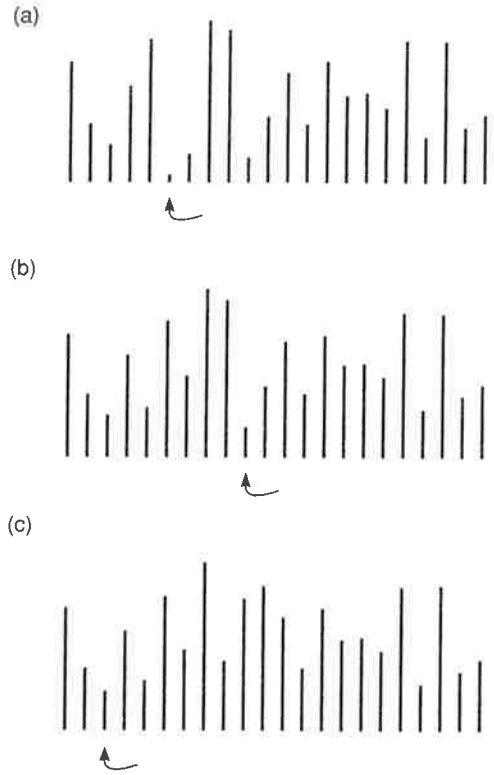


Figura 15. Regole del modello Bak-Sneppen. Nello stato iniziale (a), l'asta più breve (contrassegnata dalla freccia) e le sue due vicine sono sostituite da nuove aste di lunghezza casuale. A ogni passo successivo dell'evoluzione (b, c), le aste più brevi sono sostituite con nuove aste tendenzialmente più lunghe, sicché la lunghezza di tutte le aste a poco a poco aumenta.

tano e così evolvono rapidamente per raggiungere nuovi picchi, dove si trovano di fronte a nuove gole. Di qui la regola numero due: dopo che si è sostituita l'asta più corta con un'altra di lunghezza casuale, si sostituiscono anche le due contigue con nuove aste di lunghezza casuale. Nel modello si comincia dunque con un insieme casuale di aste corte e lunghe che rappresentano un ecosistema in un determinato stato, e si conduce la simulazione più volte. Che cos'accade?

All'inizio sono numerosissime le aste corte, ma poiché ogni volta quelle più brevi e le due contigue vengono rimpiazzate, la lunghezza media aumenta. Alla fine l'ecosistema raggiunge una condizione relativamente stabile, in cui tutte le specie si affacciano ad ampie gole, e a quel punto passa molto tempo prima che abbia luogo il balzo successivo. Da qualche parte, però, vi è un'asta assai corta; se si aspetta abbastanza a lungo, la specie corrispondente salterà su un nuovo picco.

Con quel singolo balzo evolutivo l'asta di una specie e le due contigue vengono sostituite da nuove aste casuali. Le tre aste nuove potrebbero essere discretamente lunghe, nel qual caso l'ecosistema rimarrebbe di nuovo bloccato in una lunga situazione di stallo; ma vi sono buone probabilità che una delle tre sia molto più corta dei 2/3 che rappresentano in quella condizione la lunghezza media (*figura 16*). Se vi fosse dunque un'asta così corta, la specie corrispondente, trovandosi di fronte a una gola stretta, salterebbe di nuovo e rapidamente, sicché, assieme alle due vicine, verrebbe sostituita da un'altra. Ancora una volta una delle tre nuove aste sarebbe probabilmente assai breve e condurrebbe a un altro repentino balzo evolutivo; in tal modo il sistema sarebbe interessato da una valanga evolutiva sinché alla fine, per caso, tutte le aste tornerebbero ad avere una lunghezza maggiore di 2/3. A quel punto la valanga si arresterebbe, tutte le specie si troverebbero davanti a gole ampie e bisognerebbe aspettare di nuovo a lungo prima della successiva esplosione di attività.

L'ecosistema di Bak e Sneppen, insomma, evolve fino a uno stato nel quale tutte le specie si trovano davanti a forti barriere verso un'ulteriore evoluzione. Nel contempo, anche un unico balzo evolutivo compiuto da un'unica specie può destabi-

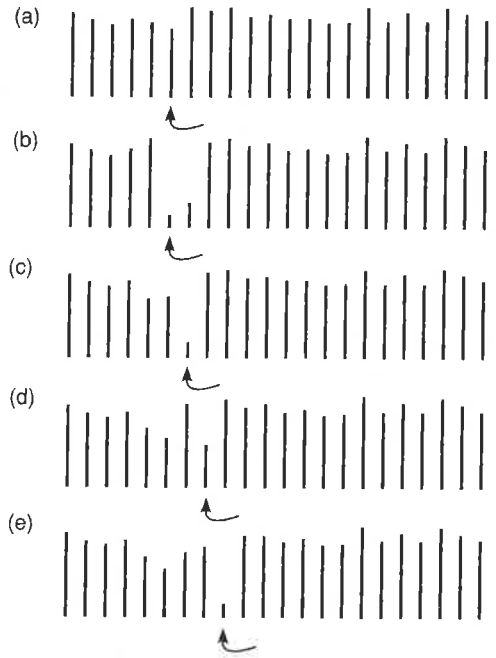


Figura 16. Valanghe nel modello Bak-Sneppen. Quando l'esplosione di attività si è placata e tutte le aste sono cresciute fino a una lunghezza media di 2/3 o più, l'ecosistema si trova in uno stato critico: ora la sostituzione dell'asta più breve ha buone probabilità di provocare una valanga di successive sostituzioni che si traducono in un lungo balzo evolutivo.

lizzare la condizione delle altre, provocando rapide reazioni evolutive a catena che interessano gran parte dell'ecosistema prima del ritorno alla quiete. Benché più complesso, il modello di Kauffman e Johnsen ha in sostanza lo stesso carattere. L'uno e l'altro ipotizzano che l'ordinario funzionamento evolutivo degli ecosistemi conduca inevitabilmente a grandi sconvolgimenti privi di una causa riconoscibile. Che sia in realtà questa la vera origine delle estinzioni di massa?

Non c'è da stupirsi se i biologi hanno criticato entrambi i modelli per una serie di ragioni.[7] Si tratta in effetti di semplificazioni eccessive della realtà biologica; ma, come abbiamo visto, il principio di universalità fa sì che anche modelli molto semplificati si rivelino perfettamente validi.[8] Bisogna però ammettere che entrambe le simulazioni hanno pecche tangibi-

li. Per esempio, a proposito dell'argomento dell'VIII capitolo, né la coppia Bak-Sneppen né la coppia Kauffman-Johnsen menzionano mai l'estinzione, che nei loro modelli coevolutivi è del tutto assente. Quando una specie salta da un picco all'altro, non si estingue: cambia solo fenotipo. Le valanghe sono soltanto valanghe di attività evolutiva.

È invece lecito pensare che quando uno sconvolgimento evolutivo costringe un centinaio di specie ad adattarsi a nuovi picchi di fitness, alcune non ce la facciano e si estinguano. Se l'evento interessa mille o diecimila specie, si estinguerà un numero proporzionalmente grande di specie, il che condurrà a una legge della potenza sia per le estinzioni sia per le valanghe evolutive. Certo, l'argomentazione non è inattaccabile, ma è senza dubbio plausibile. Nel complesso pare di arguire dai modelli illustrati che l'ecosistema globale si trovi in uno stato critico e che le estinzioni di massa siano solo il risultato raro, ma naturale e prevedibile, dell'evoluzione ordinaria. Beninteso, i modelli di Bak e di Kauffman rappresentano solo un primo tentativo di affrontare il problema.

Modelli evolutivi

Nel V capitolo ho citato il biologo Francis Crick, che in base all'esperienza personale era arrivato a considerare i matematici individui «intellettualmente pigri».[9] Immagino che direbbe lo stesso di Bak, Sneppen e tutti quelli che non giudicano assurdo elaborare modelli matematici elementari come un ecosistema composto da aste; ma forse ha un'idea piuttosto dogmatica di ciò che è o non è la «vera scienza».

Una volta Crick e il filosofo Daniel Dennett analizzarono i meriti della semplificazione teorica in ambito scientifico, in particolare il tentativo di riprodurre il funzionamento del cervello attraverso le simulazioni. Oggi quel tentativo trova espressione soprattutto nelle reti neurali, elementari reti matematiche di «neuroni» interagenti, i quali, come le cellule vere, scaricano quando sono adeguatamente stimolati da altri neuroni della rete. In tali modelli, le cellule nervose hanno poco altro in comune con quelle reali: sono neuroni concepiti dai

teorici e, proprio grazie alla loro semplicità, i teorici possono apprendere sulle proprietà delle reti neurali nozioni che non potrebbero mai apprendere se ciascun neurone fosse assai più complesso. Crick ha criticato l'intero spirito cui si informa tale metodo. Dennett riferisce di avergli sentito dire: «Può darsi che [gli ideatori dei modelli] siano bravi ingegneri, ma hanno un modo terribile di fare scienza! Voltano deliberatamente le spalle a quanto sappiamo già sul modo di interagire dei neuroni, quindi i loro modelli sono del tutto inutili come modelli del funzionamento del cervello».[10]

Credo che ben pochi biologi, fisici o scienziati di altre discipline conserveranno a lungo atteggiamenti come quello di Crick. Newton non avrebbe mai compreso il moto del nostro pianeta intorno al sole se non avesse ignorato tutte le caratteristiche della terra a parte quella di avere una massa influenzata dalla gravità. Non tenne conto del fatto che avesse un nucleo e un mantello, o che ogni giorno l'attrazione gravitazionale delle luna inducesse le acque degli oceani a ritirarsi o avanzare; né si preoccupò di includere nei calcoli la posizione e la massa precise di tutti gli alberi del pianeta. Partì dall'assunto che nessuno di quegli elementi fosse molto importante, e aveva ragione.[11] Né l'intero volume dei mari né le maree modificano di un solo minuto la lunghezza dell'anno.

Il vero problema dei modelli Kauffman-Johnsen e Bak-Sneppen è dunque un altro: se abbiano escluso troppi elementi specifici e, se sì, quali siano quelli rilevanti. Si può procedere al vaglio tornando a introdurre nel modello alcuni dei fattori esclusi e controllando se questi modifichino sensibilmente il risultato. In effetti pare che ne siano stati eliminati troppi; perché, se è vero che le simulazioni individuano l'autosimilarità dell'evoluzione attraverso le valanghe coevolutive che seguono leggi della potenza – un risultato senza dubbio straordinario – è anche vero che i numeri critici di queste leggi della potenza non corrispondono alla realtà. Nel modello Bak-Sneppen, per esempio, al raddoppiare delle dimensioni l'estinzione diventa 2,14 volte più rara, mentre attraverso la documentazione fossile risulta che nella realtà la frequenza diminuisce di quattro volte. Anche il modello Kauffman-John-

sen presenta lo stesso difetto. Se dunque rilevano l'esistenza dello stato critico e l'estrema sensibilità dell'ecosistema, quei modelli non sono però precisi nei dettagli.

Per il momento non c'è accordo tra gli scienziati in merito ai fattori da reinserire, ma è certo degna di nota la modifica apportata dai fisici Luis Amaral, del Massachusetts Institute of Technology, e Martin Meyer, dell'università di Boston. Una curiosa caratteristica dell'ecosistema Bak-Sneppen è che tutte le specie si trovano su un piano di parità: non esistono prede e predatori. Nei veri ecosistemi, invece, vi è un'intera gerarchia di livelli, con catene alimentari nelle quali certe specie stanno al vertice e altre alla base. Nel 1999 Amaral e Meyer elaborarono un modello semplice che tiene maggiormente conto delle catene alimentari; di fatto non è molto più complesso della simulazione di Bak e Sneppen, però la legge della potenza che ne emerge risulta esatta, sicché viene da pensare che l'esistenza delle catene alimentari sia un fattore importante.

Nel modello, l'ecosistema ha sei livelli, con quello più alto occupato dai predatori e quello più basso dalle prede. Ciascun livello ha un migliaio di nicchie ecologiche, cioè posizioni che possono essere occupate da alcune specie, e ogni specie di un livello si nutre di parecchie specie del livello inferiore. Amaral e Meyer iniziarono riempiendo solo in parte il livello più basso e lasciando che tutto evolvesse secondo poche, semplici regole. A ogni unità di tempo che passa, vi è una limitata probabilità che ciascuna specie crei una nuova specie, ma quando questa viene creata va a occupare a caso una nicchia vuota del medesimo livello oppure quella immediatamente soprastante o immediatamente sottostante. Questo fa sì che le specie di basso livello si diffondano e che alla fine la catena alimentare diventi completa. A ogni nuova specie vengono automaticamente assegnate come prede alcune specie del livello inferiore (*figura 17*). Inoltre, a ogni unità di tempo che passa, una piccola percentuale delle specie del livello inferiore si estingue. Non importa se le singole estinzioni avvengono a causa di cambiamenti climatici o per un forte aumento dei predatori e così via. Quali che siano i motivi, l'importante, nel modello Amaral-Meyer, è che cosa accade dopo. Quando una specie

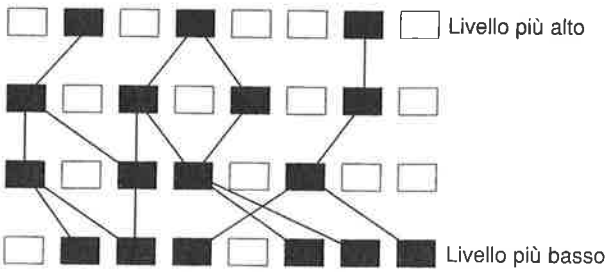


Figura 17. La catena alimentare di Amaral-Meyer. Ciascuna specie di un livello si nutre di una o più specie del livello sottostante. Le estinzioni al livello più basso provocano valanghe di altre estinzioni via via più in su lungo la catena.

del livello inferiore si estingue, l'evento influisce sulle specie del livello superiore, alcune delle quali possono per esempio scoprire che tutti gli organismi di cui erano solite nutrirsi sono scomparsi, e quindi estinguersi a loro volta. Questo avrà ripercussioni sull'intera gerarchia, dato che anche le specie dei livelli successivi potranno scoprire di avere perso tutte le loro fonti di nutrimento.

In sostanza, una catena alimentare si forma a caso, alcune specie del livello più basso possono estinguersi in qualsiasi momento e gli effetti delle estinzioni si ripercuotono verso l'alto in tutta la rete. I risultati di un simile processo all'apparenza semplice sono sorprendenti: la catena alimentare si autorganizza in uno stato critico nel quale l'estinzione di una sola, insignificante specie nelle aree inferiori della gerarchia scatena una valanga di altre estinzioni di dimensioni che vanno dal minimo al catastrofico. Ma il punto più impressionante è che, se si raddoppiano le dimensioni dell'estinzione, questa diventa quattro volte meno frequente, in perfetto accordo con la legge della potenza individuata nella realtà attraverso la documentazione fossile.

Dunque, all'origine delle estinzioni di massa c'è il normale funzionamento interno degli ecosistemi, i quali hanno la fondamentale proprietà di autorganizzarsi nello stato critico. Tale proprietà è alla base sia della dinamica ecologica di breve termine sia del funzionamento evolutivo di lungo termine che si riscontra nella documentazione fossile. Forse quindi è errato

distinguere nettamente, come s'è fatto finora, le estinzioni di massa da quelle normali.

C'è però, nel ragionamento, una pecca che rischia di far crollare l'intero edificio. Come scrisse Paul Anderson in un articolo uscito su «New Scientist» nel 1969, «non esiste problema che, per quanto complesso, non diventi ancora più complesso se considerato nell'ottica giusta».[12] È un'osservazione che vale in pieno per le estinzioni di massa.

Ritorno alle influenze esterne

L'immagine dell'ecosistema globale organizzato nello stato critico e soggetto a grandi fluttuazioni è concettualmente elegante e corrisponde a quanto è emerso dalla documentazione fossile. Ma perché il lettore si faccia un quadro chiaro delle attuali teorie sull'origine delle estinzioni di massa, dovrò menzionare gli affascinanti risultati di un'altra simulazione che porta a conclusioni assai diverse.

Nel 1995 il fisico Mark Newman, della Cornell University, concepì un modello matematico delle estinzioni nel quale le specie non interagivano affatto.[13] In altre parole, veniva completamente eliminata la dinamica interna dell'ecosistema e si assumeva che la causa di qualsivoglia estinzione fosse uno sconvolgimento prodotto dall'esterno. Come abbiamo visto nel precedente capitolo, la maggior parte dei paleontologi ritiene che le influenze esterne, come mutamenti climatici, collisioni con asteroidi e così via, siano le vere responsabili delle estinzioni di massa; e il modello di Newman getta nuova luce su questa vecchia teoria.

Come già avevano fatto Bak e Sneppen, Newman cercò di semplificare il più possibile le regole, anche se qui la logica era quella dell'estinzione per influenze esterne. Nel suo modello, ogni specie della terra ha una determinata vitalità (compresa tra 0 e 1), una determinata capacità di resistere nonostante le calamità prodotte da fattori esterni. Anche in questo caso possiamo immaginarci una serie di aste. Newman postula che una successione di influenze esterne negative colpisca il pianeta e che ciascuna sottoponga le specie a una tensione ca-

suale compresa tra 0 e 1. Proviamo a figurarci ogni tensione come un'asta-regolo che serve a misurare la vitalità delle aste-specie: tutte le specie che non arrivano all'altezza del regolo sono eliminate e sostituite da nuove aste di lunghezza casuale compresa tra 0 e 1, cioè da nuove specie che riempiono la nicchia vuota attraverso l'evoluzione ordinaria.

La continua eliminazione degli animali più deboli dall'ecosistema tende a cancellare la maggior parte delle specie dotate di scarsa vitalità e rende le aste più lunghe. Newman suppone inoltre che, durante gli intervalli tra un'influenza negativa e l'altra, una piccola percentuale delle specie dotate di grande vitalità (corrispondenti alle aste lunghe che non sono state eliminate e rimpiazzate) registri una modifica della vitalità. La logica è molto semplice: le specie non evolvono in maniera da adattarsi a età glaciali, collisioni con asteroidi o eruzioni vulcaniche, ma in maniera da adattarsi alle condizioni del loro habitat. L'adattamento all'ambiente immediato non rende più vitali di fronte agli sconvolgimenti prodotti dall'esterno, sicché durante l'evoluzione tra una calamità e l'altra la vitalità delle specie varia a caso, aumentando o diminuendo di poco. Newman include tale fattore sostituendo una piccola percentuale di aste sopravvissute con nuove aste di lunghezza casuale.

Le regole sono dunque queste e vengono seguite partendo da una serie di aste di lunghezza casuale. L'unico fattore in cui chi conduce la simulazione ha libertà di scelta è la dimensione delle calamità che colpiscono l'ecosistema: sono casuali, però si può decidere a piacimento la frequenza relativa degli sconvolgimenti di lieve o grande entità. Potrebbero essercene molti che producono una tensione vicina a 1 e solo alcuni che ne producono una vicina a 0, o viceversa. Il fatto più interessante è che il modello rivela una caratteristica molto simile all'universalità: quali che siano le scelte nella distribuzione delle influenze esterne, funziona sempre nello stesso modo. Il sistema si autorganizza in maniera tale che il risultato della tensione successiva è imprevedibile: possono estinguersi solo poche specie o sparire tutte quante. E la distribuzione delle dimensioni delle estinzioni segue una legge della potenza che

corrisponde perfettamente a quanto rilevato attraverso la documentazione fossile.

Il semplice modello di Newman è di importanza cruciale, perché mostra quanto poco i dati concreti relativi alla distribuzione delle influenze esterne incidano sull'andamento delle estinzioni. È certo vero che i mutamenti climatici, le eruzioni vulcaniche e le occasionali collisioni con asteroidi o comete influiscono sulle comunità biologiche globali; tuttavia non si conoscono le esatte conseguenze di questo o quel fattore esterno, né si sa quanto spesso simili calamità colpiscano il pianeta o quanto siano gravi. Forse continueremo a ignorare quali effetti i cataclismi producano a lungo termine sulla vita terrestre, ma attraverso il modello di Newman possiamo valutare le loro conseguenze nel lungo periodo anche senza conoscere bene la loro natura. Insomma otteniamo dei dati, per così dire, gratuitamente.

Nel caso delle estinzioni di massa, il quadro è tutt'altro che chiaro. Il modello di Newman non ci dice con sicurezza se le estinzioni di massa siano provocate da influenze interne o esterne. Uno degli obiettivi della ricerca attuale nel settore è di analizzare meglio i modelli e vedere se lievi differenze nella logica matematica alla loro base producano corrispondenze nella documentazione fossile atte a chiarire il problema. Ma anche se non consente di trarre conclusioni definitive riguardo alle estinzioni di massa, il modello di Newman punta il dito su uno dei temi fondamentali di questo libro.

Abbiamo visto come molte cose sembrino in effetti essere organizzate in uno stato critico. Ma nella fisica del non equilibrio c'è ben più di quanto non lasci pensare il mero concetto di criticità autorganizzata. Tecnicamente parlando, il modello di Newman non si autorganizza in uno stato critico; eppure rivela frattali, leggi della potenza e l'estrema sensibilità propria di quei sistemi in cui un fattore esterno molto comune e banale può scatenare uno sconvolgimento di dimensioni assolutamente sproporzionate. Inoltre, come accade nel caso dello stato critico, tale sensibilità insorge spontaneamente in una vastissima serie di condizioni. Sono, queste, le proprietà ubique riscontrabili sovente nei sistemi che non sono in con-

dizioni di equilibrio e nei quali la storia svolge un ruolo importante.

Tra l'altro, simili proprietà stanno rendendo possibile una nuova scienza teorica aperta alle suggestioni delle discipline storiche. In geofisica e in biologia la nuova impostazione si sta già facendo sentire. Ma la storia ha una portata assai più ampia e soprattutto abbraccia l'intera gamma delle attività umane. Ora che abbiamo messo insieme diversi strumenti concettuali, possiamo cominciare a vedere quali implicazioni se ne possono trarre sulla natura e sul mondo umani. Purtroppo non è sempre facile quantificare in maniera esatta i mutamenti sociali. Pur influenzandoci tutti, le rivoluzioni politiche e le nuove mode e tendenze non si possono misurare con la stessa precisione con cui si misurano le fluttuazioni di un magnete o le vibrazioni della crosta terrestre.

Iniziamo dunque con l'analizzare i mercati finanziari, dove da decenni si registrano minuto per minuto le quotazioni delle azioni e delle obbligazioni e dove si rinviene un'enorme ricchezza di dati. E in tale contesto torniamo a porci una domanda che ci siamo già posti nel I capitolo: in che senso un terremoto, un'estinzione di massa o un crollo in Borsa si possono considerare eventi affini?

X
Montagne russe

> Anno dopo anno gli economisti sfornano una pletora di modelli matematici e ne analizzano in gran dettaglio le proprietà formali; e anno dopo anno gli econometristi adattano ogni sorta di funzione algebrica a dati in sostanza sempre uguali, senza riuscire a compiere il minimo progresso nella comprensione sistematica della struttura e del funzionamento di un vero sistema economico.
>
> *Wassily Leontief*[1]

> La legge di Zauberman: peggiore è l'economia, migliori sono gli economisti.
>
> *Alfred Zauberman*[2]

Tra gli operatori del settore finanziario circolano varie boutade, come: «Un economista è un bravo professionista pagato per dare responsi errati sull'economia» o: «Gli economisti hanno previsto tutte e nove le ultime cinque recessioni». Nessuna di queste battute farebbe ovviamente ridere se non contenesse del vero. Nel 1995 una società di consulenza indipendente, la London Economics, mise a confronto l'esattezza delle valutazioni fatte da oltre trenta dei maggiori gruppi britannici impegnati nelle previsioni economiche, tra cui il ministero del Tesoro, il National Institute e la London Business School. John Kay, della London Business School, riassunse i risultati ottenuti dalla London Economics sul «Financial Times»:

> Si dà ormai per scontato che le opinioni sul futuro dell'economia sono tante quanti gli economisti, ma la verità è proprio l'opposto: in campo economico, gli «oracoli» dicono tutti la stessa cosa nello stesso momento, con una unanimità sorprendente. Le differenze tra una previsione e l'al-

tra sono minime rispetto alla differenza tra tutte le previsioni e ciò che accade realmente. Quanto affermano gli specialisti è quasi sempre sbagliato ... Le loro valutazioni concordi non hanno previsto nessuno degli sviluppi economici più importanti degli ultimi sette anni: la forza e la resilienza del boom dei consumi negli anni Ottanta, l'entità e la persistenza della recessione negli anni Novanta o il calo costante e sensibile dell'inflazione a partire dal 1991.[3]

L'economia britannica non ha, com'è ovvio, nulla che la renda particolarmente refrattaria alle previsioni, né si possono accusare di incompetenza gli economisti delle sue istituzioni. Anno dopo anno, in tutto il mondo esperti di ogni nazionalità danno il loro contributo a quella che si può solo definire un'incapacità collettiva di prevedere l'evolversi dell'economia. Nel 1993 l'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico analizzò le proprie previsioni relative al periodo 1987-1992, nonché quelle elaborate dal Fondo monetario internazionale e dai governi di Stati Uniti, Giappone, Germania, Francia, Italia e Canada. Conclusione? Non solo tutte quante erano completamente errate, ma quelle relative all'inflazione e al prodotto interno lordo sarebbero state migliori se le istituzioni interessate avessero buttato alle ortiche i sofisticati modelli utilizzati e si fossero limitate a presumere che le cifre siano sempre uguali ogni anno.[4] Di recente, esaminando le previsioni dell'ultimo secolo, un autorevole analista finanziario ha commentato: «Quando hanno fatto previsioni riguardanti il denaro, gli economisti, i grandi investitori e i giornalisti avvezzi a citarli hanno sbagliato non già una, ma tutte le volte, immancabilmente».[5]

Eppure gli economisti tradizionali sembrano concordemente credere nella capacità dei governi e delle banche centrali di gestire l'economia manovrando le «leve della politica economica». Sulle pagine del «Wall Street Journal» o del «Financial Times», economisti, imprenditori e ministri dei dicasteri finanziari non fanno che discutere del modo migliore per contenere la spesa pubblica, le aliquote fiscali e così via. Certo, c'è forse un nocciolo di verità in alcune tesi: se domani la Federal Reserve Bank alzasse i tassi d'interesse di alcuni punti percentuali, avrebbe buone probabilità di frenare l'economia ameri-

cana, mentre una riduzione delle tasse di solito incrementa i consumi.[6] Spesso, però, gli addetti ai lavori tendono a essere troppo ottimisti riguardo alla controllabilità del sistema economico. Nel 1998 un economista del Massachusetts Institute of Technology scrisse, a proposito dell'ottima salute dell'economia americana:

> L'espansione è destinata a durare: ancora per parecchi anni l'economia americana non conoscerà recessione. La recessione non la vogliamo, non la cerchiamo e quindi non l'avremo ... abbiamo gli strumenti per proseguire nell'attuale boom.[7]

Se così fosse, perché mai avremmo attraversato periodi neri in passato? Se gestire l'economia è davvero così facile, come mai gli economisti non sono più bravi nelle loro previsioni? E come mai si verificò un evento calamitoso come il crollo della Borsa del 1987, per giunta senza la minima avvisaglia?

Alla diffusa convinzione che l'economia si possa controllare, si aggiunge l'altrettanto radicata idea che un'improvvisa, sensibile oscillazione verso l'alto o verso il basso debba avere una causa specifica e identificabile. Nel I capitolo abbiamo visto che molti analisti attribuirono la responsabilità del crac del 1987 a programmi computerizzati di assicurazione portafoglio, così come altri avevano attribuito l'origine del crac del 1929 all'eccessivo indebitamento. Sempre con il senno del poi, nel 1997 gli economisti imputarono all'enorme debito estero la colpa dell'improvviso sgretolarsi di un miracolo economico: l'incredibile (fino ad allora) boom delle «tigri» del Sudest asiatico.

Poiché di un'economia sono partecipi innumerevoli persone, ciascuna con le proprie idee, strategie, speranze e apprensioni, e innumerevoli aziende e organizzazioni che competono per conseguire distinti obiettivi, è comprensibile che prevedere il futuro sia difficile. Ma poiché nei capitoli precedenti abbiamo osservato in altri settori un andamento analogo, invece di attribuire un valore così importante al fattore umano converrà che verifichiamo se la spiegazione del fenomeno non sia più semplice. Sappiamo che i terremoti violenti, i grandi incendi boschivi e le estinzioni di massa dipendono soltanto dalle sensibili quanto inevitabili fluttuazioni accusate

universalmente dai sistemi non in equilibrio, fluttuazioni cui ci si potrebbe sottrarre soltanto alterando le leggi di natura.

Avventurarsi nel mondo dell'economia significa ovviamente lasciarsi alle spalle le leggi della fisica e della biologia. Non si possono descrivere con la matematica l'intelligenza e l'indole di un individuo reale, meno che mai di milioni di individui; né si possono riprodurre anche solo in maniera rudimentale i loro desideri, sogni ed emozioni. Diversamente dai magneti e dalle placche continentali che si spostano secondo rigide regole fisiche, la gente compie delle scelte. Tuttavia le idee, i sentimenti, i desideri e le aspettative possono essere contagiosi, e come un micromagnete influisce sull'allineamento del suo vicino, così le azioni di una persona o un'azienda si influenzano a vicenda. Ebbene, che cosa sappiamo dello stato critico? Sappiamo che la sua organizzazione non dipende affatto dall'esatta natura dei sistemi interessati, ma solo dal modo in cui l'influenza del singolo elemento si propaga agli altri.

Lo stato critico non caratterizzerà allora anche il funzionamento dei sistemi sociali umani? Ogni giorno Wall Street erutta una valanga di cifre e poiché lo stato critico segue una legge matematica, i mercati finanziari rappresentano un buon punto di partenza per la nostra analisi.

I fondamentali

Alla base della diffusa convinzione che l'economia possa essere in gran parte controllata e gestita c'è un concetto economico fondamentale, la «teoria del mercato efficiente». Se di recente un economista l'ha definita «il più grave errore nella storia delle teorie economiche»,[8] molti altri continuano a sostenerla senza riserve.[9] Secondo tale teoria, nel mercato tutti obbediscono all'avidità e all'interesse. Come hanno scritto di recente J.D. Farmer e A. Lo in una relazione:

> Spinti da un'incontenibile avidità, innumerevoli investitori si affrettano ad approfittare di tutti i vantaggi informativi, anche minimi, che vengono loro offerti, così facendo incorporano le informazioni nei prezzi di mercato e quindi eliminano ben presto le occasioni di profitto in vista delle quali avevano agito.[10]

Se un'azione è sottovalutata, dice la teoria del mercato efficiente, il pubblico ne fa incetta pensando di guadagnare molto al momento di rivenderla. Più la domanda aumenta, più la quotazione sale, finché l'azione non è più sottovalutata e l'equilibrio viene ripristinato.

Nel mercato efficiente l'offerta corrisponde perfettamente alla domanda e i prezzi sono sempre giusti; il loro valore, cioè, rispetta e rispecchia quelli che in gergo economico, sottintendendo «principi», si chiamano «i fondamentali». Se si possiedono titoli si ricevono i dividendi e il valore reale dell'azione, quello che una persona ragionevole sarebbe disposta a pagare per comprarla, dovrebbe dipendere dalle prospettive concrete che l'azienda ha di crescere, realizzare profitti e pagare dividendi in futuro. Le quotazioni della Borsa di New York dovrebbero quindi riflettere i dati fondamentali riguardo alle aziende e al loro reale valore. Se un'industria commettesse un grosso errore o se venisse promulgata una legge che le procurasse uno svantaggio competitivo, i fondamentali cambierebbero e le quotazioni, di conseguenza, scenderebbero.

Sulla base di tali assunti, gli economisti riconoscono che i prezzi di mercato dovrebbero crescere e calare in maniera lieve e irregolare. Nessuno può prevedere che andamento avranno le quotazioni, dato che sono informazioni «fresche di stampa» a determinare le variazioni influenzando i fondamentali. In quale nuovo progresso tecnico o pecca della politica aziendale ci s'imbatterà svoltato l'angolo? A mano a mano che arrivano le notizie, i prezzi dovrebbero cambiare e riportare sempre l'economia in condizioni di equilibrio.

Secondo la visione tradizionale, l'economia è come una vasca d'acqua: a livello microscopico le singole molecole sono impegnate in una danza folle e confusa, però in condizioni di equilibrio la loro frenesia viene compensata. Se si inclina la vasca è facile prevedere che l'acqua si riorganizzerà per cercare un equilibrio in accordo con le leggi della fisica. Analogamente, se in campo economico si aziona una leva riducendo per esempio i tassi d'interesse, il campo da gioco di tutti gli operatori razionali del mercato si inclinerà; poiché chiedere in prestito costerà meno, ciascuna persona o azienda sarà inco-

raggiata a prendere in prestito e a spendere un po' di più e questo stimolerà l'economia, che raggiungerà in fretta un nuovo equilibrio favorevole all'aumento della produzione.

Ma c'è un problema: nessuna teoria dell'equilibrio potrà mai spiegare fluttuazioni brusche e gigantesche come quelle che caratterizzarono i crac borsistici del 1929 e del 1987. Nel 1987 che cosa fece perdere al Dow Jones, l'indice dei titoli industriali, oltre il 22 per cento del valore in una sola giornata? Il Dow Jones rappresenta le quotazioni delle azioni di un numero limitato di società che operano in diversi settori e che sono state scelte come buoni indicatori della vitalità economica generale. Come ha osservato un economista:

> È difficile credere che i fondamentali possano subire un cambiamento così brusco da indurre tutti gli agenti di cambio a pensare, nel giro di mezza giornata, che il ritorno del capitale calerà di oltre il 20 per cento. Eppure questo si sarebbe dovuto pensare quando, nell'ottobre del 1987, i mercati azionari di tutto il mondo crollarono.[11]

Come abbiamo visto, davanti a un fenomeno così incredibile molti analisti diedero la colpa ai programmi computerizzati di assicurazione portafoglio. E molti non solo credono fermamente in questa spiegazione, ma sono anche convinti che non possa capitare un altro crac perché nel frattempo si è rimediato al problema. Nel 1998, riferendosi ai programmi computerizzati di contrattazione, due eminenti economisti scrissero sul «Wall Street Journal»: «Le fonti di fragilità strutturale sono state quasi del tutto corrette, sicché... è assai improbabile che si ripetano i catastrofici eventi del 1987».[12]

Tuttavia le analisi matematiche compiute nell'ultimo decennio narrano una storia assai diversa e assai meno confortante. Secondo le cifre, i crolli improvvisi, lungi dall'essere improbabili, sono praticamente inevitabili. In pieno contrasto con la teoria del mercato efficiente, la matematica ci dice che le forti fluttuazioni delle quotazioni di Borsa sono causate dal naturale funzionamento interno dei mercati e che accadono anche se non vi sono «fonti di fragilità strutturale» o modifiche improvvise dei fondamentali. E il motivo del fenomeno forse è semplice: i mercati non sono affatto in stato di equilibrio.

Fluttuazioni violente

Nel 1900 il matematico francese Louis Bachelier presentò all'École Supérieure di Parigi un'insolita tesi intitolata *Théorie mathématique de la spéculation*. L'analisi non fu ben accolta dai professori della sua facoltà, che alla fine gli negarono l'incarico accademico cui aspirava.[13] Forse rimasero delusi perché, invece di concentrarsi su uno dei tradizionali argomenti della fisica teorica o sperimentale, aveva tentato di elaborare una teoria matematica dei movimenti dei prezzi.

Poniamo che il prezzo di una libbra di cotone sia oggi di dieci sterline; quale sarà per esempio tra un mese? Ovviamente non abbiamo modo di saperlo con sicurezza: è una questione di statistica e probabilità. Secondo Bachelier, se si fossero registrate le variazioni dei prezzi del cotone di mese in mese per lunghi periodi, si sarebbe ottenuto qualcosa di simile alla curva a campana che abbiamo visto nel III capitolo (*figura 1*). Poiché la curva a campana descrive molti fenomeni in natura, l'ipotesi pareva plausibile. Nel complesso il prezzo sarebbe aumentato e calato un pari numero di volte, sicché il picco della curva sarebbe stato espresso dallo zero, equivalente a «nessun cambiamento». Ricordiamoci che la curva a campana scende bruscamente; e ciò quadrava con l'idea di Bachelier che le variazioni più sensibili di una quantità tipica fossero assai rare.

Nel complesso, dunque, Bachelier riteneva che le quotazioni seguissero un tranquillo «andamento casuale» e che ogni mese aumentassero e calassero in misura tipica e lieve; e la sua analisi matematica produsse diagrammi che corrispondevano con straordinaria esattezza a quelli dei prezzi reali. Egli avrebbe certo meritato un trattamento migliore di quello che gli riservò la commissione d'esame della facoltà; di fatto, la sua teoria rivelò le prime pecche solo dopo oltre mezzo secolo.

Come abbiamo già visto, nel 1963 Benoît Mandelbrot analizzò i prezzi del cotone e s'imbatté nella peculiare configurazione dell'autosimilarità, che lo condusse infine a elaborare la geometria frattale. Qualsiasi piccola porzione, anche minuscola, del grafico della variazione dei prezzi appariva, se allungata, molto simile all'insieme. Questa è una delle espressioni

dell'autosimilarità; ma Mandelbrot ne trovò un'altra. Bachelier aveva ragione a pensare che gli aumenti e le diminuzioni dei prezzi fossero casuali. Mandelbrot scoprì che se un mese la quotazione sale un poco, ciò non rende più o meno probabile che il mese successivo salga ancora oppure scenda: i prezzi seguono effettivamente un andamento casuale. Ma quando studiò come fossero distribuite per dimensione le variazioni casuali, non trovò affatto la curva a campana di Bachelier,[14] ma un andamento da legge della potenza. In altre parole, diversamente da quanto credeva Bachelier, le variazioni dei prezzi non avevano una «dimensione tipica».

Negli anni Novanta i ricercatori si servirono delle simulazioni al computer per analizzare meglio le fluttuazioni del mercato mobiliare e del mercato valutario in tutto il mondo, e giunsero regolarmente ad analoghi risultati: le leggi della potenza e le fluttuazioni violente non avevano una scala intrinseca. Nel 1998, per esempio, il fisico Gene Stanley, a capo di un'équipe di ricercatori dell'università di Boston, analizzò le oscillazioni del famoso indice azionario Standard & Poor's 500.[15] Basato sui titoli di cinquecento importanti società quotate alla Borsa di New York, l'indice misura, come il Dow Jones, la tendenza generale del mercato. Stanley e i suoi collaboratori studiarono le quotazioni registrate ogni quindici secondi nei tredici anni che andavano dal 1984 al 1996: una quantità incredibile di materiale, per un totale di 4,5 milioni di campioni. Il grafico relativo a tali anni rivela una lunga, lenta tendenza al rialzo complicata da molti aumenti e diminuzioni irregolari (*figura 18a*).

Per mettere in evidenza le fluttuazioni, possiamo ignorare sia la tendenza sia se vi fu aumento o calo in qualsiasi intervallo dato; così facendo otteniamo un grafico più significativo, che mostra solo le dimensioni totali delle variazioni avvenute a ogni intervallo di un minuto (*figura 18b*). L'immagine presenta vari picchi. Analizzando in dettaglio le fluttuazioni, Stanley e i colleghi scoprirono che, ogniqualvolta raddoppiava, la variazione diventava sedici volte meno frequente. Ricordiamoci che l'importante nella legge della potenza non è tanto il numero critico, quanto la regolarità geometrica, che ci dice che non c'è differenza qualitativa tra piccole e grandi fluttuazioni.

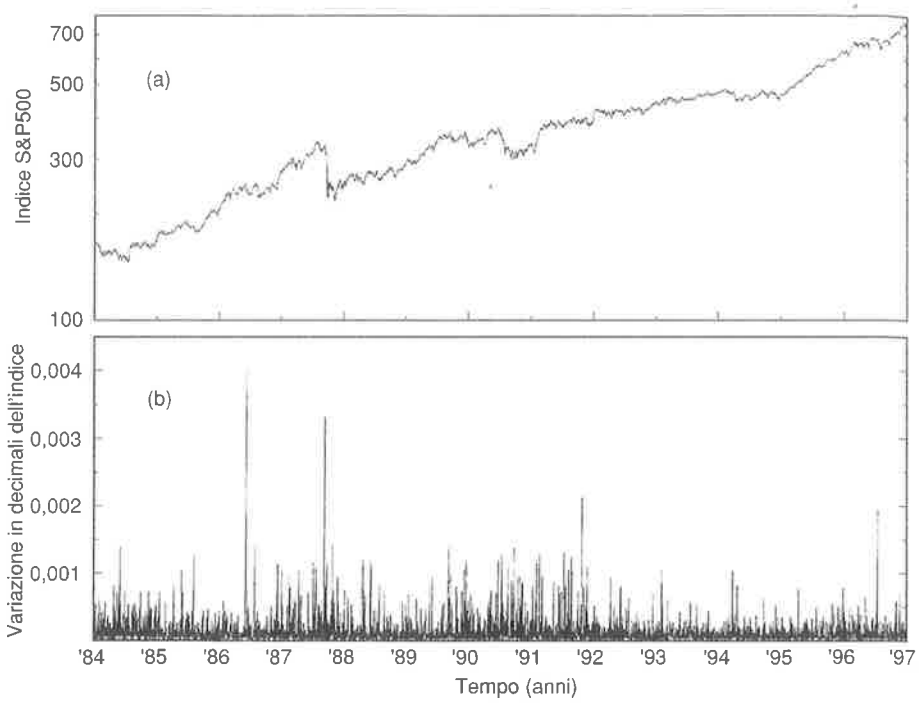


Figura 18. Il grafico delle quotazioni minuto per minuto (a) dell'indice Standard & Poor's 500 (S&P500) tra il 1984 e il 1997 rivela, oltre a una graduale tendenza al rialzo, numerose fluttuazioni. Per mettere in evidenza le fluttuazioni, converrà ignorare sia la tendenza sia l'aumento o il calo dei prezzi in qualsivoglia intervallo. Si otterrà così un grafico (b) che mostra solo le dimensioni totali della variazione dei prezzi (in termini percentuali) avvenuta in ogni intervallo di un minuto. (Adattamento di immagini tratte da Y. Liu et al., *Statistical properties of the volatility of price fluctuations*, «Physical Review E», 1999, 60, pp. 1-11. Riproduzione autorizzata.)

La legge della potenza ci dice anche che non esiste una fluttuazione tipica e che non c'è quindi motivo di ritenere inusuali le forti oscillazioni in su o in giù. L'ipotesi che le variazioni brusche e violente siano imputabili a motivi particolari sembra infondata: in contrasto con quanto tenderebbe a suggerirci l'intuito, anch'esse appaiono normali come tutte le altre. Gli scienziati a volte dicono che la distribuzione della legge della potenza ha «coda larga», perché la sua curva scende in maniera meno brusca di quella a campana. D'altra parte è logico che così faccia, perché gli eventi estremi improbabili che motivano

la «coda stretta» della curva a campana qui sono tutt'altro che improbabili, tant'è che è sbagliato definirli «estremi». Seguono la legge della potenza sia le fluttuazioni dell'indice Standard & Poor's per periodi di minuti, ore e giorni, sia le quotazioni di un migliaio di singole aziende.[16] Altri ricercatori hanno individuato analoghe leggi della potenza in altri mercati azionari[17] e valutari,[18] per cui è lecito dedurre che forti fluttuazioni siano una caratteristica universale di tutti i mercati; lo studio delle variazioni dei prezzi dei titoli è solo uno dei modi per metterla in evidenza.

L'équipe di Stanley concentrò l'attenzione anche sulla cosiddetta volatilità del mercato, che è un contrassegno dell'imprevedibilità del settore ed è un altro dato di grande interesse per gli investitori. Si prende il grafico delle variazioni dei prezzi minuto per minuto e lo si fraziona in «finestre» di parecchie ore; poi, calcolando quanto siano state violente le oscillazioni minuto per minuto all'interno di ogni finestra, ci si fa un'idea del loro andamento. Un diagramma del genere per l'indice Standard & Poor's mostra che il mercato è assai più calmo in certi periodi che in altri (*figura 19*). Inoltre si possono analizzare anche le fluttuazioni della volatilità, ossia ve-

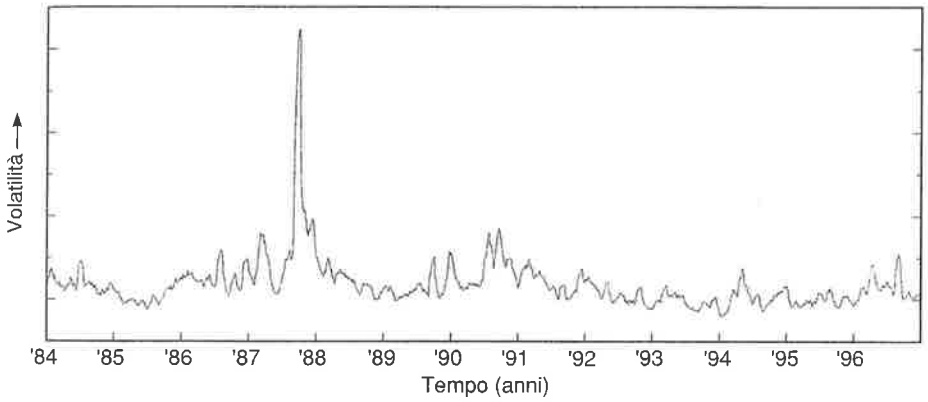


Figura 19. Mediando l'entità delle variazioni dei prezzi minuto per minuto (della figura 18b) su intervalli di un mese, si ha modo di vedere se il mercato in certi periodi registra fluttuazioni più forti che in altri. In effetti in certi periodi le fluttuazioni risultano più violente, e anche la volatilità varia sensibilmente. (Adattamento di un'immagine tratta da Y. Liu et al., *Statistical properties of the volatility of price fluctuations*, cit. Riproduzione autorizzata.)

rificare con quanta intensità e irregolarità il mercato oscilli tra i periodi di turbolenza e i periodi di calma. Chi ha compiuto tale ricerca ha trovato un'ennesima legge della potenza invariante di scala. In altre parole, il mercato non ha un'irregolarità tipica nelle fluttuazioni; e la volatilità è a sua volta assai volatile.[19]

L'esistenza delle fluttuazioni violente mette in seria discussione la teoria del mercato efficiente e in equilibrio. In condizioni di equilibrio, le fluttuazioni dovrebbero essere lievi come le credeva Bachelier. Che cosa potrebbe renderle così intense?

Soggetti irrazionali

Ai non economisti la teoria tradizionale, secondo la quale gli esseri umani sarebbero soggetti razionali che calcolerebbero razionalmente il loro interesse e agirebbero in base a esso, appare assai discutibile. Osserva l'economista Paul Ormerod:

> La visione economica classica postula che i soggetti agenti in qualsivoglia mercato ... raccolgano ed elaborino efficacemente innumerevoli dati, in base a questi formulino ipotesi plausibili sui probabili costi e benefici associati alle possibili strategie, e reagiscano nella maniera giusta a incentivi e disincentivi ... L'unica cosa che questi ipotetici individui non farebbero ... sarebbe di lasciarsi influenzare, nella linea d'azione, dagli altri; inoltre si presume che i loro gusti e preferenze siano immutabili e indipendenti dal comportamento altrui.[20]

Per capire quanto sia errata una simile visione, proviamo a riflettere sull'industria miliardaria della pubblicità. Sarebbe un'inammissibile ingenuità credere che i pubblicitari ci forniscano informazioni affinché decidiamo nella maniera migliore. La pubblicità funziona perché tutti noi siamo suggestionabili e manovrabili, e anche perché, una volta che siamo stati influenzati, con le nostre credenze e il nostro comportamento influenziamo gli altri. Per citare un esempio fatto da Ormerod, la teoria economica classica è in grado di spiegare perché la serie televisiva a pupazzi animati *Teletubbies* ha avuto tanto successo? I telespettatori hanno agito tutti in maniera indipendente e razionale per inseguire il proprio tornaconto? O non è

invece più plausibile che l'interesse per il programma si sia trasmesso a valanga da una mente e un individuo agli altri? La moda è un fattore di grande importanza e tuttavia le teorie economiche tradizionali non ne riconoscono neppure l'esistenza.

L'enorme successo di alcuni film, libri, dischi, automobili e altri prodotti è forse dovuto ad analoghe valanghe di interesse. Nel 1994 la rivista di spettacolo «Variety» raccolse dati sugli incassi lordi registrati dai cento film di maggior successo del 1993. Un grafico del rapporto tra incassi e grado di popolarità rivela una legge della potenza con coda piuttosto cospicua, dal che si deduce quanto sia difficile prevedere il successo di un film.[21] Il film più popolare del 1993 ebbe un incasso oltre quaranta volte superiore a quello del centesimo in classifica, che era pur sempre stato uno dei più gettonati dell'anno. Come mai? Noi in genere sappiamo se andremo a vedere un film molto prima di andare a vederlo sul serio e perfino prima di averne sentito parlare concretamente. Attraverso i giornali, la televisione, il tam tam di amici e conoscenti ci facciamo in qualche modo un'opinione. Non si può negare che le persone si sentano stimolate e interessate a fare una certa cosa quando sanno che altre lo sono. Non c'entrano nulla le decisioni razionali: c'entrano invece esseri umani che si influenzano a vicenda in maniera irrazionale.

Nel 1999 due ricercatori europei si chiesero se le impressionanti fluttuazioni dei mercati finanziari non fossero imputabili a fattori analoghi. L'economista Thomas Lux, dell'università di Bonn, e l'ingegnere elettrotecnico Michele Marchesi, dell'università di Cagliari, decisero di verificare se le proprietà statistiche delle quotazioni di Borsa fossero dovute a influenze esterne, come le modifiche dei fondamentali previste dalla teoria classica, o a «mutue interazioni dei partecipanti». Per raggiungere l'obiettivo seguirono un metodo che ormai ci è familiare: elaborarono un modello assai semplificato del mercato azionario e condussero simulazioni al computer.

Proviamo a immaginare una Borsa con un unico tipo di titolo e una popolazione di operatori che comprano e vendono.

Nella vita reale gli agenti di cambio seguono una gamma immensa di strategie, ma Lux e Marchesi supposero che, per mentalità, si suddividessero in tre sole categorie: i fondamentalisti, che compravano solo azioni sottovalutate (cioè con quotazioni momentaneamente più basse del valore reale) e vendevano quelle sopravvalutate; gli ottimisti, che, convinti dell'imminente rialzo, compravano azioni ritenendole un investimento opportuno; e i pessimisti, che, convinti dell'imminente ribasso, vendevano per ridurre le perdite. Gli ultimi due gruppi non basavano il proprio comportamento sui fondamentali, ma speculavano su quelle che reputavano essere le tendenze del mercato.

Il modello di Lux e Marchesi funziona così: si parte dal presupposto che l'azione abbia un valore autentico determinato dai fondamentali e che questo valore fluttui leggermente nella maniera immaginata a suo tempo da Bachelier. I fondamentalisti tengono d'occhio le oscillazioni e il valore effettivo e comprano o vendono basandosi su tali calcoli; gli ottimisti e i pessimisti ignorano i fondamentali e seguono invece le tendenze del prezzo di mercato, il quale naturalmente non è detto coincida con il valore reale dell'azione. Alla fine è l'interazione tra gli operatori a produrre il prezzo effettivo. In qualsiasi momento vi sono vari fondamentalisti, ottimisti e pessimisti che vogliono tutti comprare e vendere: più la domanda è forte, più alto è il prezzo; più l'offerta è forte, minore è il prezzo.

Fin qui il modello rispetta la teoria economica classica, a cui si limita ad aggiungere un dettaglio molto concreto, ossia che la gente specula sulle quotazioni dei titoli. La chiave del gioco sta in un'ulteriore aggiunta: l'idea che le persone si influenzino a vicenda.

Giochi mentali

Poiché gli esseri umani sono soggetti a reciproche influenze, Lux e Marchesi supposero che la suddivisione tra fondamentalisti, ottimisti e pessimisti non fosse immutabile. Anche le persone dotate di forti convinzioni si lasciano suggestionare dalle azioni degli altri o da tendenze che appaiono troppo spiccate

per essere ignorate. Se le quotazioni continuassero a salire per un certo tempo, un convinto pessimista potrebbe trasformarsi in ottimista; e se continuassero ad aumentare con tale costanza da far pensare a una tendenza stabile e persistente, anche il fondamentalista riterrebbe sciocco non approfittarne. Lux e Marchesi incorporano questo concetto nel loro modello, supponendo che in qualsiasi momento ogni operatore abbia una minima possibilità di cambiare parere. Se per esempio gli ottimisti sono più numerosi dei pessimisti, la convinzione più diffusa è che il mercato continui ad aumentare. Poiché la gente si fa influenzare dall'opinione altrui, diventa più probabile che altri investitori si orientino verso l'ottimismo. Se le quotazioni da tempo scendono, alcuni ottimisti potranno perdere fiducia e diventare pessimisti o fondamentalisti.

In sostanza, i due ricercatori usano regole semplici per riprodurre il modo in cui gli investitori comprano e vendono azioni definendo, con la loro attività, i prezzi, e includono nella simulazione la probabilità che i soggetti cambino strategia in base al comportamento degli altri. Questo basta a spedire il prezzo delle azioni sulle montagne russe. Conducendo la simulazione con un migliaio di operatori virtuali, Lux e Marchesi partirono, come abbiamo visto, dal presupposto che i fondamentali fluttuassero lievemente descrivendo la curva a campana e che tali fluttuazioni inducessero alti e bassi altrettanto lievi nelle quotazioni. Ma osservarono che il funzionamento interno del mercato comportava a tratti fluttuazioni assai più forti: rialzi o ribassi giganteschi la cui causa appariva del tutto ignota. Analizzando i dati a esse relativi, scoprirono che le oscillazioni violente corrispondevano in maniera quasi perfetta a quelle dei mercati reali: si riscontravano autosimilarità, invarianza di scala (su tutte le scale temporali) e una distribuzione delle variazioni dei prezzi espressa, come quella del mercato vero, da una legge della potenza che rivelava una spiccata tendenza alle fluttuazioni forti.[22]

Fulcro del modello è in pratica solo l'idea che le persone si influenzino a vicenda. Eppure, sulla base di una proprietà così semplice, la rete di operatori si organizza in maniera peculiare: un piccolo squilibrio a favore dell'ottimismo conduce a

un rialzo delle azioni, ciò trasmette ottimismo ad altri operatori, la tendenza al rialzo diventa allora ancora più spiccata, le quotazioni aumentano ancora di più e così via, in una catena autoalimentante di azione e reazione. A un certo punto la reazione a catena finisce e magari si inverte: alcuni fondamentalisti si convincono che il titolo sia molto sopravvalutato e lo vendono, provocando un piccolo calo del prezzo; di colpo altri operatori diventano pessimisti e vendono a loro volta, sicché le quotazioni diminuiscono ancora di più e così via. La tendenza al ribasso può essere lieve e momentanea oppure persistere così a lungo da riportare i prezzi del titolo al punto di partenza.

Siamo lontani dalla teoria classica, secondo la quale alla base delle grandi fluttuazioni del mercato vi sarebbero le difficoltà delle aziende quotate, gli eventi politici, le decisioni del governo e via dicendo. Nel mondo reale gli operatori parlano di rialzi e ribassi e dicono che la Borsa valori ha un «umore». Nel modello di Lux e Marchesi l'umore ce l'ha davvero, perché tutti gli investitori che agiscono al suo interno hanno il proprio. Poiché ogni umore ne influenza un altro, i mercati sembrano intrinsecamente organizzati in uno stato critico nel quale qualsiasi fugace barlume di speranza o dubbio rischia di ingigantirsi in maniera quasi impensabile. Ha scritto il finanziere Bernard Baruch:

> Per loro natura, tutti i movimenti economici sono motivati dalla psicologia della folla. Se non si comprende a fondo l'umore della folla ... le nostre teorie economiche faranno regolarmente acqua ... Ho sempre pensato che le follie da cui noi esseri umani siamo periodicamente afflitti rispecchino un tratto profondamente radicato nella nostra natura ... È una forza del tutto impalpabile ... ma è necessario conoscerla per formulare giudizi esatti sugli eventi correnti.[23]

Le osservazioni di Baruch ben si attagliano alla realtà matematica delle fluttuazioni di mercato emersa dal modello di Lux e Marchesi. Benché siano assai più complessi degli atomi dotati di momento magnetico, dei chicchi di riso o delle placche continentali, gli esseri umani – nessuno escluso – sono soggetti a influenze, ed è per questo che i movimenti di massa sono comuni. Perlomeno nel contesto dei mercati finanziari, il

mondo umano condivide il carattere tumultuoso e mutevole dello stato critico. Se si calcola che il cambiamento d'umore di un solo investitore può determinare un'onda crescente di effetti capace di produrre il mutamento dell'umore di quasi tutti gli altri operatori, si concluderà che è praticamente impossibile prevedere l'andamento di un mercato.

La constatazione appare tutt'altro che confortante per l'investitore medio. La maggior parte della gente sa, o dovrebbe sapere, che le tendenze al rialzo o al ribasso sono del tutto imprevedibili. Nonostante le sicure previsioni di «orsi» e «tori», ribassisti e rialzisti, e nonostante quanto si legge sui giornali, l'analisi matematica dimostra che, qualunque cosa abbia fatto nell'ultima settimana, mese o anno, la Borsa potrà tanto scendere quanto salire nell'immediato futuro. Ma questo dà solo una vaga idea dell'imprevedibilità o, per così dire, «perturbabilità» del mercato. La legge della potenza relativa alle fluttuazioni dei prezzi mostra come anche l'entità approssimativa della variazione imminente sia imprevedibile. In un mercato organizzato nello stato critico, anche i grandi crolli della Borsa valori sono eventi ordinari e naturali, per quanto in effetti sia lecito non aspettarseli spesso. Pur in assenza di qualsiasi preavviso, domani il mercato potrebbe diminuire del 20 per cento: simili eventi non sono imputabili a cause eccezionali.

Il governo è in grado di prevenire tali catastrofi? Pare alquanto improbabile, perché non riusciamo neppure a intuire in quale momento si verificherà il crollo. Tuttavia negli ultimi anni gli economisti hanno discusso di una possibile strategia governativa volta a tenere sotto controllo l'economia riducendone la «perturbabilità» e allontanandola dal punto critico. È stata infatti proposta la Tobin tax (dal nome del Nobel per l'economia James Tobin che l'ha ideata) su tutte le transazioni speculative, ossia su quelle che un codice di regole giudica volte solo a speculare sulle tendenze di mercato anziché a investire nel pieno rispetto dei fondamentali. In altre parole, con la tassa si vorrebbero scoraggiare gli investitori dal saltare sul carro del vincitore e si vorrebbe ridurre così il rischio che le influenze negative si propaghino. Nessuno sa se la legge funzionerebbe: gli operatori potrebbero infatti trovare gli espedienti

per aggirarla, con il risultato che i mercati rimarrebbero critici. Inoltre la tassa avrebbe quasi sicuramente un effetto deleterio sulla Borsa, perché per esempio ridurrebbe il volume d'affari complessivo, penalizzando molte delle transazioni attuali. In conclusione, la proposta Tobin è buona o cattiva? «Un economista serio dovrebbe rispondere: "Non lo so"» ammette Thomas Lux.

Forse saremo costretti a sopportare per l'eternità le fluttuazioni violente. E forse la struttura delle reti sociali – nei mercati come altrove – è, per qualche motivo, soggetta a perturbazioni più di tutti gli altri sistemi fisici che abbiamo esaminato finora.

Piccoli mondi

Nel 1967 lo psicologo americano Stanley Milgram condusse un esperimento singolare. Inviò a varie persone del Kansas e del Nebraska una lettera che conteneva un'altra lettera destinata a un suo amico, un agente di cambio di Boston di cui non veniva dato l'indirizzo, ma solo il nome e la professione. Chiunque riceveva la lettera doveva farla arrivare a destinazione inviandola a una persona di sua conoscenza che pensava avesse maggiori probabilità di conoscere l'agente di cambio. Incredibilmente, lo psicologo scoprì che ciascuna lettera aveva raggiunto il destinatario finale in soli sei passaggi. In soli sei passaggi, cioè, venne trovato qualcuno che conosceva di persona l'uomo di Boston e che quindi poté mandargli la missiva direttamente.

Nacque così il concetto dei «sei gradi di separazione», che è divenuto popolare, ma che, pur suonando affascinante, sembra molto improbabile. Com'è infatti possibile che, su un pianeta abitato da sei miliardi di persone, ogni individuo sia collegato a tutti gli altri attraverso una catena di non oltre sei conoscenti?

Se fosse fondata, la teoria spiegherebbe perché, quando andiamo in Thailandia o Alaska o quando telefoniamo in Zambia, ci capita di parlare con qualcuno che conosce il padre del nostro migliore amico o la parrucchiera di nostra suocera o la

moglie del professore che fu relatore della nostra tesi di laurea. Sono proprio coincidenze del tutto improbabili? E se lo sono, come mai capitano così spesso? Non sarà che Milgram ha ragione e il mondo è, almeno in termini umani, molto piccolo? Nel 1998 i matematici Duncan Watts e Steve Strogatz, della Cornell University, cercarono di chiarire il dilemma elaborando una loro teoria dei grafi.

Per un matematico un grafo è una griglia di punti con alcune linee di collegamento tra i punti. È un buon metodo per rappresentare le persone (i punti) e le loro relazioni (le linee di connessione). Qualcuno penserà magari che non si possa imparare molto da punti e linee, ma non è così. A un polo di questo mondo matematico c'è il grafo casuale, che si forma scegliendo coppie di punti a caso e unendoli con linee fino a ottenere un intricato diagramma di «spaghetti» (*figura 20a*); al polo opposto c'è il grafo ordinato, con connessioni molto regolari che collegano punti vicini tra loro, sicché l'immagine finale ci appare come una rete da pesca o un reticolato (*figura 20b*).

Passare da un lato all'altro di un grafo casuale è facilissimo: se si parte per esempio da un punto su un lato, bastano pochi passaggi per raggiungere qualsiasi punto dell'altro lato, perché ci sarà quasi sicuramente qualche connessione di lunga durata che avrà un'estremità abbastanza vicina a quei due punti e fungerà da scorciatoia. I grafi ordinati, invece, non presentano il cosiddetto «effetto piccolo mondo»: non dispo-

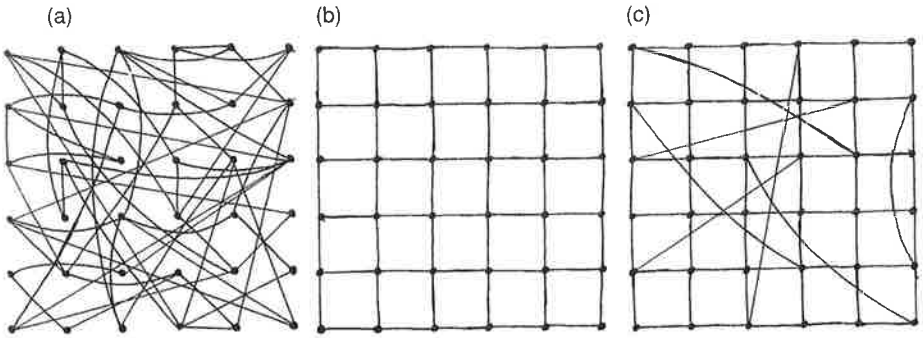


Figura 20. In un grafo casuale (a) si può andare da qualsiasi parte in pochi passaggi, mentre in un grafo ordinato occorrono molti più passaggi per spostarsi da un punto all'altro (b). I grafi piccoli mondi (c) si trovano tra i due estremi.

nendo di scorciatoie, ci costringono a compiere piccoli passi lungo tutto il tragitto. Le reti sociali del mondo reale somigliano forse a grafi casuali? Se così fosse, si spiegherebbe come mai le lettere di Milgram arrivarono così rapidamente a destinazione. Ma c'è un intoppo.

Se riflettiamo sulla nostra cerchia di amicizie, constateremo che molte delle persone che sono nostre amiche sono anche amiche tra loro. È tipico delle reti di amici. Nel grafo sociale, quindi, molti dei punti rappresentanti i nostri amici dovrebbero essere collegati non solo con noi, ma anche tra di loro. I grafi ordinati hanno questa caratteristica di grappolo, mentre quelli casuali no. Prendiamo un punto di un grafo casuale e consideriamo i vari punti a esso collegati con una singola linea: saranno tutti quanti sparpagliati e solo raramente connessi l'uno all'altro. Se una rete sociale fosse come un grafo casuale, non esisterebbero gruppi di amici.

Se dunque i grafi casuali, con il loro carattere di piccolo mondo, paiono riprodurre l'incredibile intrico delle reti sociali vere, sono però i grafi ordinati a presentare l'aggregazione a grappolo tipica delle reti umane. Sembrerebbe un paradosso, se a soccorrerci non venisse un'altra classe di grafi posta tra i due estremi. Watts e Strogatz presero un grafo ordinato e lo riorganizzarono in parte, interrompendo alcune connessioni brevi per sostituirle con connessioni casuali di lunga distanza (*figura 20c*). In seguito studiarono gli effetti prodotti dalle modifiche e scoprirono che quelle poche scorciatoie avevano una scarsa influenza sulla disposizione a grappolo dei punti all'interno del grafo, ma ne avevano moltissima sul numero medio di passaggi necessari per andare da un punto qualsiasi all'altro. In altre parole, un numero minimo di scorciatoie può trasformare un grafo ordinato in un grafo piccolo mondo che presenta ancora struttura a grappolo, ma nel quale bastano pochi passaggi per andare praticamente dappertutto.[24]

Per verificare se le reti sociali reali fossero organizzate allo stesso modo, i due matematici si rivolsero, curiosamente, al mondo dello spettacolo. Trovare dati utili sulle reti di amicizie non è tanto facile, mentre un'ampia documentazione permette di sapere facilmente quale attore recitò in quale film nell'ar-

co, poniamo, di mezzo secolo. Immaginiamo un grafo in cui ciascun punto corrisponda a un attore e le linee connettano attori che hanno recitato insieme in qualche film. Secondo la teoria di Watts e Strogatz, in tale grafo tutti gli attori che avessero recitato in un film americano si troverebbero a non più di quattro passaggi dall'attore Kevin Bacon, il quale ha interpretato molte parti in molti film, ma di rado è stato protagonista. Elvis Presley sarebbe a soli due punti di distanza da lui, perché fu, con Walter Matthau, nel cast di *La via del male* (1958) e Matthau fu, con Bacon, nel cast di *JFK* (1991).

I due ricercatori scoprirono però anche che Bacon non era così speciale, in quanto l'intera rete aveva la proprietà di piccolo mondo. In genere ogni attore è collegato a tutti gli altri attraverso tre o quattro passaggi. Anche se magari le cifre cambiano leggermente, pare che tutte le reti sociali presentino l'effetto piccolo mondo e forse è questo il segreto matematico che spiega come mai ognuno di noi sia collegato a tutti gli altri, da Monica Lewinsky al papa, attraverso «sei strette di mano». In tutto questo, però, si cela un messaggio più importante.

L'effetto piccolo mondo delle reti sociali reali permise alle lettere di Milgram di giungere a destinazione in fretta. Watts e Strogatz elaborarono anche un modello della diffusione delle malattie infettive basato sul grafo piccolo mondo e scoprirono che le epidemie si diffondevano molto più in fretta di quanto non avrebbero fatto nelle reti ordinate; inoltre, alla propagazione bastavano pochissime connessioni scorciatoia. Da cui l'inquietante corollario che malattie pericolose possono diffondersi dappertutto venendo trasmesse da un punto all'altro del globo da pochi viaggiatori «di lungo corso».

E la diffusione delle idee? Come abbiamo visto in questo capitolo, pare che i mercati finanziari siano imprevedibili perché le convinzioni e le aspettative di ogni investitore influiscono su quelle degli altri. L'effetto piccolo mondo delle relazioni sociali e commerciali intessute dagli operatori dei mercati finanziari accresce la facilità con cui le citate influenze si amplificano in maniera sproporzionata e forse rende più probabile che le forti oscillazioni dello stato critico sconvolgano i mercati. Poiché il concetto di rete piccolo mondo è stato elaborato da

poco, restano da verificare le sue conseguenze finali sul funzionamento delle varie reti sociali.

Forse a questo punto qualche lettore proverà perplessità, per non dire forti dubbi. In fondo non è difficile credere che una teoria matematica ispirata alla fisica dei magneti possa spiegare importanti caratteristiche della crosta terrestre, delle foreste e degli ecosistemi: dopotutto si tratta di fenomeni appartenenti ai regni della fisica e della biologia, regolati da solide e rigide leggi. Ma può suonare azzardata l'idea che anche gli esseri umani seguano le leggi dello stato critico. Come può un principio organizzativo universale applicarsi a persone che agiscono in base al libero arbitrio? Vuol forse dire che la legge della potenza per le fluttuazioni dei mercati finanziari vale anche per altri fenomeni e che lo stato critico si riscontra in altri settori della vita umana?

Nel XII capitolo analizzeremo da vicino il possibile significato dello stato critico in contesti come la storia della scienza e la storia umana in generale. Ma prima dovremo fare una breve pausa e rispondere ai legittimi dubbi e incertezze cui ho appena dato voce per conto dei lettori. Come vedremo, il libero arbitrio non ci permette in alcun modo di sfuggire all'inevitabilità dello stato critico; e quando si parla di leggi della potenza, lo stato critico, o qualcosa di molto simile, risulta l'unica spiegazione possibile.

XI
Volenti o nolenti

> Potersi liberare è nulla: il difficile è saper essere liberi.
>
> *André Gide*[1]

> Che sia bene o male, talvolta anche rompere qualcosa è molto piacevole.
>
> *Fëdor Dostoevskij*[2]

Forse qualche lettore si domanderà a questo punto se le teorie esposte nel X capitolo non siano in contrasto con una prerogativa umana fondamentale come il libero arbitrio, che tutti noi siamo convinti di avere. Scrivendo il mio libro, ho creduto di scegliere liberamente certe parole anziché altre, così come voi credete di averlo comprato per libera scelta, preferendolo ad altri. Anche gli operatori e gli investitori di Wall Street sono persone pienamente autonome, che pensano in maniera autonoma e che ogni giorno sono libere di decidere se comprare o vendere un migliaio di azioni, obbligazioni o opzioni oppure stare a guardare. Gli esseri umani non sono chicchi di riso o granelli di sabbia che rotolano dai pendii secondo leggi preordinate.

Una volta afferrato il concetto, non è difficile convincersi che la logica fondamentale dello stato critico è alla base di sistemi semplici come un mucchietto di sabbia o di sistemi più complessi come le zolle della crosta terrestre o gli alberi delle foreste, dove precise leggi fisiche controllano il diffondersi dell'attività da un'area all'altra. Quando la tensione si accumula troppo lungo una faglia, i due blocchi rocciosi scivolano, trasferendo la tensione su rocce più lontane lungo la linea di frattura.

Sistemi del genere non ci costringono a valutare fattori impalpabili e instabili come pensieri ed emozioni. Ma quando ci troviamo davanti a situazioni umane, le cose non sono così semplici, perché – almeno così crediamo – le persone decidono da sole se diffondere o no una certa influenza. Dunque, prove matematiche a parte, non è troppo azzardato supporre che lo stato critico abbia qualcosa a che vedere con il mondo umano?

Negli ultimi quattro capitoli, a cominciare dal prossimo, analizzeremo la criticità nell'ambito della scienza e della storia umane e vedremo se non sia in grado di chiarire le origini degli eventi tumultuosi che avvengono in tali contesti. Bisognerà quindi, adesso, discutere brevemente il problema del libero arbitrio e accertare se davvero la libertà di scelta impedisca irreparabilmente alle regolarità matematiche di irrompere nel mondo umano; ma posso già anticipare che la risposta è no. Non faremo fatica ad accettare l'idea che la percentuale delle persone che si sposano in Gran Bretagna scenda con lentezza e costanza anche se ciascun individuo continua a scegliere autonomamente il proprio destino. È evidente che il libero arbitrio non impedisce affatto che si rilevino modelli matematici nel comportamento di migliaia o milioni di persone. Ma vediamo di analizzare meglio il concetto.

Scopritori di sentieri

Tra gli imponenti edifici di pietra e mattoni dei campus universitari si trovano tranquilli spazi vuoti quali piazzette, spianate, praticelli e angoli bucolici pienamente in sintonia con il clima di apertura mentale favorevole all'apprendimento. Gli studenti si siedono o sdraiano sotto il sole in quei luoghi ameni per mangiare un panino, dormire, leggere o anche solo meditare. Ma, volendo, potrebbero studiare la matematica del comportamento umano. In genere gli architetti dei campus progettano vie pedonali asfaltate che, con le loro linee diritte e i loro angoli acuti, facilitano gli spostamenti da un punto all'altro delle aree verdi; ma gli studenti, notoriamente ribelli, seguono strade proprie, scavando col tempo diversi sentieri sterrati e serpeggianti.

Figura 21. Un sistema di viottoli scorciatoia formatosi nel campus dell'università di Stoccarda. (Fotografia cortesemente fornita da Dirk Helbing, università di Stoccarda. Riproduzione autorizzata.)

La gamma dei sentieri è vasta: si va da comuni scorciatoie che attraversano zone prive di vie pedonali a reti assai più intricate di viottoli che si intersecano, come quella dell'università di Stoccarda (*figura 21*). Il fisico Dirk Helbing percorreva spesso quei sentieri e, nel 1996, si domandò se la loro formazione non obbedisse a una legge e non fosse perciò prevedibile. È chiaro che quando attraversa tali aree, ogni studente sceglie in piena libertà e non è affatto tenuto a seguire gli altri. Eppure, come presto scoprirono Helbing e i suoi colleghi, ciò non impedisce ai viottoli di aumentare secondo leggi altrettanto precise di quelle che regolano il moto dei pianeti.

Perché si formino è facile capirlo: sebbene infatti siano dotati del prezioso libero arbitrio, gli individui hanno delle tendenze. Proviamo a immaginare un prato o uno spiazzo prima che si siano formati sentieri; quando li attraversano, gli studenti si dirigono ovviamente verso il punto desiderato, per esempio un pub all'altro capo dell'area o un'aula ancora più lontana. Noi non seguiamo quasi mai una linea perfettamente diritta; preferiamo inoltre camminare sul terreno più conforte-

vole, aggirando le pozzanghere ed evitando zone accidentate, fangose e umide. Perlopiù seguiamo la via asfaltata, ma non sempre, perché, se abbiamo sete e se per raggiungere il pub al capo opposto dello spiazzo siamo costretti a percorrere l'intero perimetro e a perdere tempo inutilmente, prendiamo una scorciatoia.

Non tutti vanno al pub, naturalmente, ma anche altri si trovano a decidere se restare sul sentiero asfaltato o tagliare per l'erba. In un primo tempo è assodato che ciascuno si comporta come crede. Però, a mano a mano che la gente sceglie e che i passi si succedono agli altri, la situazione cambia. Quando qualcuno cammina sull'erba e la pesta, il tragitto da lui seguito diventa un poco più allettante per i futuri pedoni. La differenza è minima quando a passare è stato un solo individuo, ma quando ne sono passati mille si delinea chiaramente un sentiero che induce altri ad abbandonare la via asfaltata. A un certo punto il nuovo viottolo diventa così ben battuto e visibile che torme di persone lo imboccano con la meccanicità del bestiame, rendendolo sempre più marcato.

È così che, in sostanza, si formano i sentieri. Ma Helbing e i suoi colleghi scoprirono che su questo piccolo fenomeno s'innestava un'intera teoria. Bastano poche, semplici equazioni per descrivere come ciascun pedone, in media, cerchi di trovare un equilibrio tra i sentieri più brevi e quelli più facili, e come l'erba, a furia di essere calpestata, porti a un'erosione del terreno che altera la rete dei viottoli disponibili in futuro. Per arrivare a questa descrizione matematica occorre specificare la geometria dell'area erbosa, l'ubicazione delle mete più comuni, la quantità di individui che ogni giorno entrano da ciascun lato e così via. Si conduce poi una simulazione al computer con la quale si spediscono decine di migliaia di persone sulle aree erbose e si vede dove si creano i sentieri.

I viottoli virtuali si delineano negli stessi punti di quelli reali. Nel caso del campus di Stoccarda, Helbing e i suoi colleghi scoprirono che le equazioni descrivevano un elegante sistema nel quale tre sentieri si dirigevano verso il centro dell'area verde e lì si intersecavano, come nella realtà, con un triangolo centrale di sentieri più brevi. Le equazioni non solo conduco-

no a tale configurazione, ma permettono di capire perché si formi. Un numero limitato di individui attraversa ogni giorno spiazzi erbosi, per cui anche la lunghezza totale dei viottoli che si possono formare è limitata: la gente non può calpestare più di tanto il terreno e l'erba ricresce su tutte le piste poco frequentate. All'interno di tali limitazioni, i viottoli che si creano costituiscono un sistema «ottimale»; sono, cioè, strutturati in maniera da consentire alle persone lo spostamento lungo sentieri abbastanza corti e di facile percorribilità.

La dimostrazione teorica rappresenta ovviamente solo un punto di partenza. Con l'ausilio delle equazioni, i progettisti dovrebbero riuscire a pianificare le dimensioni e la forma degli spiazzi erbosi e a disporre edifici e stradine asfaltate in maniera da integrare le tendenze umane. A tal fine occorrerebbe raccogliere importanti dati concreti, come l'ubicazione delle mete più frequentate e il numero di persone abituate ad attraversare l'area ogni giorno. Pare ormai indubbio che i sentieri creati dai passanti si formino davvero secondo le leggi descritte dalle equazioni di Helbing e colleghi.[3]

L'esempio non c'entra con lo stato critico e l'ho fatto solo per mostrare con quanta facilità il libero arbitrio dell'individuo coesista con la notevole regolarità dell'attività di gruppo. Pur essendo il frutto della libera iniziativa di migliaia di persone guidate dai propri personali obiettivi, la peculiare rete di sentieri dell'università di Stoccarda segue elementari regole matematiche.

Lo sviluppo delle città

Cercare di capire perché una città sia diventata grande e un'altra sia rimasta piccola significa studiare molteplici fattori storici, geografici e socioeconomici. Durante la guerra civile americana la Confederazione stabilì la propria capitale a Richmond, in Virginia. Oggi Richmond è una città di 900.000 abitanti, ma se i sudisti avessero vinto la guerra civile, forse sarebbe diventata il quintuplo. Washington nacque con la funzione di capitale del paese; Chicago si sviluppò perché era un collegamento chiave tra gli stati dell'est e quelli dell'ovest;

Pittsburgh e Cleveland, nel Midwest, fiorirono in quanto importanti centri dell'industria siderurgica. Charlottesville, in Virginia, è invece rimasta relativamente piccola benché sia vicina a Washington e non è stata toccata da alcuna industria.

Considerato che i fattori in gioco sono innumerevoli e che la gente si sposta da un posto all'altro per motivi personali, potremmo giudicare impossibile rilevare regolarità matematiche nell'evoluzione delle città. Invece, nel 1997, Damian Zanette e Susanna Manrubia, dell'Istituto Fritz Haber di Berlino, scoprirono che le regolarità c'erano. Per individuarle bisogna mettere da parte le caratteristiche storiche di posti specifici come Chicago, Memphis o Cleveland, e prendere invece in esame tutte le città in una volta.

Procuratisi i dati concernenti 2400 centri americani, i due ricercatori contarono la popolazione cominciando dai nuclei di 100.000, 200.000 e 300.000 abitanti, per arrivare fino a New York, che con i suoi nove milioni è la metropoli più popolosa degli Stati Uniti. Insomma studiarono le città come Gutenberg e Richter avevano studiato i terremoti, e trovarono una legge analoga. Le cifre rivelano che per ogni città di quattro milioni di abitanti, come Atlanta, ce ne sono quattro di due milioni, come Cincinnati, per ogni città di due milioni ce ne sono quattro di uno, e così via: la perfetta regolarità geometrica continua fino ai paesi di soli 10.000 abitanti. Perciò tutti questi centri, anche se sorsero per una serie di circostanze e ragioni contrastanti, seguono immancabilmente una semplice legge matematica.

Considerato che la gente è libera di scegliere se trasferirsi in una località piuttosto che in un'altra, può stupire che obbedisca a una regolarità matematica. Zanette e Manrubia non analizzarono solo i nuclei americani, ma anche i 2700 centri più grandi del mondo e i 1300 maggiori della Svizzera; e trovarono la stessa esatta legge della potenza, la quale parrebbe essere una conseguenza universale del processo di aggregazione della popolazione nelle città. Il fenomeno, come hanno osservato i due ricercatori, è singolare

> se si considera che i dati riguardano condizioni demografiche, sociali ed economiche assai diverse: quelli relativi al mondo concernono perlopiù i paesi in via di sviluppo, gli altri un paese avanzato ma pur sempre

giovane come gli Stati Uniti e un paese antico con una popolazione relativamente assai stabile come la Svizzera.[4]

Insomma pare proprio che il principio di universalità operi a livello di popolazione. Per qualche motivo le differenze tra un luogo e l'altro non hanno alcuna influenza sul numero di abitanti delle città grandi, medie e piccole.

Le implicazioni di questa legge della potenza sono le solite: non esiste una dimensione «tipica» delle città degli Stati Uniti o di altre nazioni e non ha senso credere che situazioni storico-geografiche speciali abbiano indotto lo sviluppo dei centri più grandi. L'evoluzione di una città è un processo analogo a quelli che abbiamo già analizzato, assai affine allo stato critico. Si potrebbe pensare che, quando viene fondata a causa della sua ubicazione, industria e così via, una città sia destinata a diventare grande, ma la legge della potenza ci dice che non si può prevedere quali saranno alla fine le sue dimensioni. Forse non fu nulla di speciale o «predestinato» a segnare l'inizio di New York, Città del Messico e Tokyo. Se si potesse riavvolgere la bobina della storia e proiettarla ex novo, vi sarebbero ancora grandi metropoli, ma avrebbero altri nomi e sorgerebbero in località diverse. E tuttavia la legge matematica che descrive il loro sviluppo resterebbe la stessa.

Vi può dunque essere una regolarità matematica nell'aggregazione di una popolazione. Certo, non può dirci che cosa farà una certa persona, ma può dirci che tipo di configurazione ha più probabilità di emergere da milioni di persone. Inoltre non si tratta di una matematica complessa. Zanette e Manrubia definirono lo sviluppo essenziale delle città con un modello assai semplice che presentava due sole caratteristiche fondamentali. Poiché la scelta umana di trasferirsi, avere figli e così via è del tutto imprevedibile, assunsero che di anno in anno le variazioni nella popolazione fossero, in qualsiasi luogo, casuali, e introdussero un'unica regola: siccome è logico aspettarsi che nella popolazione di una metropoli come New York City le fluttuazioni siano maggiori che in cittadine come Lubbock (Texas), postularono che le variazioni annuali nelle varie località aumentassero proporzionalmente al numero de-

gli abitanti; in altre parole, che più erano gli abitanti, più sensibile fosse la fluttuazione.[5]

È anche vero che la gente tende a «fluire» da centri con un'alta densità a centri con densità inferiore, perché cerca più spazio, case a prezzi più convenienti e così via; ed è vero che tali fattori potrebbero livellare la popolazione, cancellando le città e inducendo la gente a distribuirsi in maniera omogenea nel territorio. Ma in un ambiente semplificato come il modello del mucchietto di sabbia, Zanette e Manrubia hanno scoperto che l'influenza livellante è decisamente inferiore alle fluttuazioni, le quali incrementano le differenze di popolazione, conducendo allo sviluppo di «città», cioè di grappoli di persone aggregate. Il fatto che una legge della potenza regoli le dimensioni urbane non può che indurci a tralasciare i fattori economici e le caratteristiche geografiche: il processo attraverso il quale i centri abitati di tutto il mondo nascono e si sviluppano è sotto certi aspetti molto più semplice di quanto si pensi.

La semplicità si estende ulteriormente se consideriamo le configurazioni relative ai raggruppamenti di individui nelle città. Le foto aeree notturne di Londra o Berlino sono assai diverse, ma se si osservano bene le immagini, si nota che sono frattali dello stesso identico tipo. Vi sono, sparsi per le città, raggruppamenti maggiori e minori di persone che seguono una legge della potenza. Non c'è una dimensione «tipica» del raggruppamento e la distribuzione sul territorio della popolazione presenta una sorta di autosimilarità: quando lo si ingrandisce, qualsiasi piccolo raggruppamento appare molto simile all'insieme e ha al suo interno raggruppamenti più piccoli.

In breve, benché diverse, le città sono anche profondamente somiglianti e sono frattali come il magnete bidimensionale nel punto critico. Ed è paradossale, ma forse non così strano, che al momento attuale il modo migliore di descrivere la configurazione della popolazione all'interno di un dato centro urbano sia utilizzare modelli semplici presi in prestito dalla teoria delle transizioni di fase.[6]

Ricchi e poveri

Tra le altre cose il principio di universalità insegna che spesso, per capire un fenomeno e cogliere la logica essenziale alla sua base, occorre mettere tra parentesi molte delle sue peculiarità. Come abbiamo appena visto, il modo di aggregarsi della gente nelle città non è affatto connesso alla natura umana degli abitanti. Potrà suonare in certo modo offensivo, ma configurazioni analoghe si osservano, per motivi analoghi, nelle colonie di batteri, nei grappoli di particelle di fuliggine sul soffitto, perfino nella maniera in cui si accumula o, più spesso, non si accumula il denaro nelle nostre tasche e nei nostri conti in banca.

Perché qualcuno diventa ricco e qualcun altro povero? Come nel caso delle città, i motivi sono molteplici e senza dubbio connessi alle condizioni in cui si nasce, alle possibilità di istruirsi e così via. Ma nonostante le differenze di ceto e di talento che possono influire sul successo economico, si osserva nella distribuzione della ricchezza una semplice regolarità: se si calcola il numero delle persone che negli Stati Uniti hanno un patrimonio netto di un miliardo di dollari, si scopre che ve ne sono il quadruplo con un patrimonio di 250 milioni e così via. Se questa legge matematica valesse per un solo paese, una sola forma di governo e un solo periodo storico, forse la si potrebbe considerare una curiosità dovuta a una precisa politica dell'amministrazione, ma lo stesso andamento si riscontra in Gran Bretagna, in Giappone e in quasi tutti gli altri paesi del mondo.

All'inizio del 2000 i fisici francesi Marc Mézard e Jean-Philippe Bouchaud spiegarono tale regolarità matematica con un metodo non troppo diverso da quello utilizzato da Damian Zanette e Susanna Manrubia. Supponiamo che la ricchezza di ciascun individuo aumenti o diminuisca ogni anno di una percentuale a caso, che non ci siano investimenti «sicuri» e che l'introito di ciascuno, in qualsivoglia anno, sia del tutto casuale. Supponiamo anche che l'entità delle variazioni casuali sia proporzionale alla ricchezza dei soggetti, dato che i ricchi possono investire di più e quindi guadagnare o perdere più dei

poveri. Supponiamo infine che ciascun individuo contribuisca a creare la ricchezza di altri lavorando per loro, investendo soldi nella loro azienda e così via. Sono assunti di base che difficilmente si possono mettere in discussione. Eppure Mézard e Bouchaud scoprirono che, in un semplice modello comprendente solo quei fattori, la distribuzione della ricchezza risultava seguire una legge della potenza.[7]

Constatiamo quindi per l'ennesima volta che il fatto che le persone interagiscano guidate dai loro programmi, progetti, timori e decisioni personali non impedisce l'emergere di una regolarità matematica, la quale è connessa non tanto alla natura dei singoli, quanto a un'organizzazione universale tendente a formarsi in qualunque insieme di elementi interagenti. Tale regolarità non consente di prevedere chi diventerà ricco e chi no, ma illustra in qualche modo quella che potremmo chiamare la «fisica fondamentale» del flusso e dell'aggregazione del denaro.

Come spero sia ormai chiaro, non ha senso pensare che la volontà dei singoli esseri umani possa ostacolare regole matematiche valide per vasti raggruppamenti di persone. Pensarlo significherebbe dimenticare la distinzione tra le leggi relative ai singoli oggetti, come atomi, individui ecc., e quelle relative a grandi numeri di oggetti. In fisica vi sono leggi che regolano il comportamento sia dei singoli elementi sia degli insiemi: i micromagneti di un pezzo di ferro si orientano in un modo o nell'altro in base a leggi fisiche semplici e precise, e leggi altrettanto precise descrivono le interazioni tra grandi numeri di atomi dotati di momento magnetico. Nel mondo umano forse non si riscontrano regolarità matematiche nel comportamento individuale, ma ciò non significa che non possano emergerne nel comportamento di grandi numeri di persone.

Qualcuno si chiederà se non sia possibile spiegare in altro modo le leggi della potenza. Che la stessa regolarità si osservi in luoghi diversi non vuol necessariamente dire che ci troviamo di fronte alla medesima causa. Se durante la notte cadono tutti gli alberi della nostra proprietà, potremo supporre che uno sia caduto perché le radici erano marce, un altro sia stato indebitamente abbattuto dal nostro vicino e, insomma, vi sia

stata una distinta causa per ogni crollo. Però è anche possibile cercare una spiegazione più semplice: ricordandoci del violento temporale notturno e notando che gli alberi giacciono rivolti verso la stessa direzione, potremo pensare che siano stati sradicati dal vento.

Analogamente, a spiegare nella maniera di gran lunga più chiara la presenza di quelle semplicissime leggi della potenza è l'ipotesi che sia in atto un processo universale; e l'ipotesi diventa ancora più affascinante se si considera che l'universalità è alla base di sistemi composti da molti elementi interagenti e che opera allo stesso modo indipendentemente dalla natura degli elementi stessi. Inoltre, al di fuori della fisica del non equilibrio, è assai difficile rinvenire sistemi regolati dalle leggi della potenza.

XII
Terremoti culturali

> La storia non può formulare leggi dal potere predittivo. Capire il passato è utile al presente se ci consente di approfondire la conoscenza della natura umana, ci fornisce stimoli e moniti e ci permette di elaborare teorie valide, ancorché fallibili, sulla probabilità che determinati eventi si verifichino in determinate condizioni. Ma niente di tutto ciò si avvicina anche solo lontanamente alla granitica certezza predittiva di una legge scientifica.
>
> *Richard Evans*[1]

> Un giorno tutte le idee in cui crediamo attualmente saranno sottoposte a revisione. Quello a cui crediamo, quindi, è per forza di cose non vero. Penso che possiamo credere solo in cose che non sono la verità...
>
> *Max Guyll*

Quale fu la vera causa della prima guerra mondiale? Ad accendere la scintilla fu naturalmente il terrorista serbo Gavrilo Princip, ma quali motivi concreti e profondi provocarono un conflitto da molti considerato «la più grande calamità che abbia mai colpito il genere umano»?[2] Dal 1918 in poi, gli storici avanzarono numerose ipotesi. In America Sidney Fay imputò la responsabilità a certe fragilità delle relazioni internazionali, come un fitto groviglio di segreti disegni espansionistici e mezzi politici insufficienti a comporre le dispute.[3] In Russia, e non c'è da stupirsene, i bolscevichi dichiararono che la guerra aveva rappresentato il naturale tracollo del mondo capitalista. Molti altri storici puntarono il dito sulla malvagità dei tedeschi. L'americano Charles Beard criticò tale diffusa convinzione e, ironizzandovi sopra, la definì «teoria della scuola di catechismo»:

la Russia, la Francia e l'Inghilterra, tre caste e pure fanciulle, traboccanti di pensieri di pace, d'un tratto, mentre si recavano al catechismo, furono assalite dalle turpi Austria e Germania, che da tempo ordivano crudeli trame nel buio.[4]

In seguito gli storici ammisero, con Beard, che la teoria della Germania cattiva era troppo semplicistica, anche se non si convertirono al punto di vista di Harry Elmer Barnes, uno storico contemporaneo di Beard che, quasi a illustrare la profonda diversità delle possibili interpretazioni, aveva concluso:

L'unica responsabilità diretta e immediata della prima guerra mondiale va imputata in parti uguali alla Francia e alla Russia. Terza responsabile, ma in misura molto minore, fu l'Austria, che però tutto voleva tranne che una guerra globale europea. All'ultimo posto nella scala delle colpe dovremo mettere Germania e Inghilterra, che durante la crisi del 1914 apparvero entrambe contrarie al conflitto. Forse il popolo tedesco era un poco più favorevole alle campagne militari di quello inglese, ma nel 1914 il Kaiser si sforzò assai più di Sir Edward Grey di preservare la pace in Europa.[5]

Gli storici non si sono ancora messi d'accordo né sulle cause reali del conflitto 1914-1918 né su quelle di molti altri avvenimenti, come la guerra civile americana o la conquista normanna del 1066. D'altra parte non c'è da stupirsene. In fondo non esiste un determinismo storico: non ci sono equazioni o principi fondamentali infallibili a cui gli studiosi possano far riferimento quando cercano di spiegare un evento. Nella legge di gravitazione i fisici trovano l'origine del moto dei pianeti e della forma della galassia; ma la storia non somiglia alla fisica. Nella storia gli «accidenti cristallizzati» alterano in continuazione il campo da gioco su cui si dovrebbe dispiegare il futuro, sicché lo storico può solo accontentarsi di ipotesi.

Per spiegare perché nell'autunno del 1944 l'esercito alleato di Eisenhower si trovasse sul Reno, dobbiamo fare riferimento a molteplici fattori, come la prima guerra mondiale e il trattato di Versailles che le pose termine e che umiliò pesantemente la Germania, l'ascesa al potere di Hitler nel 1933, i successi dell'esercito tedesco in Francia e nel resto dell'Europa occidentale e la sua sconfitta finale in Russia. Non possiamo ignorare che il programma americano di aiuti ebbe un'importanza

cruciale per il rifornimento di materiale bellico alla Gran Bretagna e alla Russia, né possiamo ignorare la rilevanza dell'attacco giapponese a Pearl Harbor, che indusse gli Stati Uniti a entrare in guerra. Dobbiamo inoltre tener conto delle tante decisioni prese sul campo di battaglia, come il fatale ordine con cui Hitler, il 24 maggio 1940, arrestò la decisiva avanzata del generale Heinz Guderian, la cui prima divisione Panzer si trovava a soli quindici chilometri da Dunquerque. Se quel giorno il Führer avesse tenuto la bocca chiusa, i mezzi corazzati di Guderian avrebbero catturato o distrutto l'intero corpo di spedizione britannico; e se si fossero verificati uno o mille altri fatti del genere, forse Eisenhower non avrebbe mai raggiunto il Reno.

Quale di quegli eventi fu più importante e quale meno? Nell'analisi, lo storico non sfugge alle proprie inclinazioni personali. Qualcuno cerca le cause profonde negli intrighi politici, qualcun altro nell'interazione tra fattori economici, sociali e culturali, qualcun altro ancora nel forte carisma di personaggi come Hitler o Stalin. Insomma, pur avendo vissuto gli stessi avvenimenti e consultato gli stessi documenti, storici diversi raccontano storie diverse.

È, questo, uno degli inevitabili problemi cui gli studiosi si trovano di fronte. Supponiamo però, tanto per fare un'ipotesi, che tutti si mettessero d'accordo e che nell'analisi di un evento pervenissero, dopo adeguato studio, alla stessa versione dei fatti. Come sarebbe, una simile versione? Riuscirebbe per esempio a cogliere tutte le sfumature di un avvenimento drammatico come la prima guerra mondiale? E che cosa lascerebbe inspiegato? Archiviamo per il momento la storia vera e proviamo a esaminare il processo di narrazione di un evento in un contesto assai più semplice.

Storia di un mucchietto di sabbia

Immaginiamo che uno storico studiasse il mondo dei mucchietti di sabbia e che questo mondo un giorno venisse spazzato via da un'enorme valanga. Lo studioso potrebbe spiegare l'avvenimento in questo modo:

I problemi iniziarono una settimana fa nell'estremo ovest, dove, verso sera, un unico granello di sabbia cadde in un punto del nostro mucchio, che era già ripidissimo. L'evento produsse una piccola valanga formata da alcuni granelli che rotolarono a valle in direzione est. Purtroppo il mucchietto non era stato gestito in maniera adeguata a ovest e quei pochi granelli finirono per trovarsi in un'altra regione molto ripida del mucchio. Presto altri granelli rotolarono e per tutta la notte la valanga crebbe, tanto che la mattina dopo era ormai fuori controllo. A posteriori, non c'è da stupirsi del fenomeno. Un fatale granello caduto una settimana fa generò una catena di eventi che provocarono una catastrofe nel mucchio e perfino nel nostro cortile, qui a est. Se solo le autorità occidentali, mostrando maggior senso di responsabilità, fossero intervenute prima a togliere un po' di sabbia dal sito iniziale, avrebbero scongiurato la catastrofe. Possiamo solo sperare che tragedie del genere non si ripetano più.

Una simile cronaca degli avvenimenti è senza dubbio di grande interesse per lo storico e per tutte le persone colpite dal disastro, ma spiega le origini del disastro? Nel mucchietto di sabbia ogni valanga, piccola o grande che sia, può essere «spiegata» con una dettagliata descrizione, granello per granello, degli eventi, il che dimostra come i granelli obbediscano alle leggi della fisica granulare. Ma c'è un problema più arduo da risolvere: che cosa ha consentito a un singolo granello di provocare una catastrofe così grande da distruggere l'intero mucchio?

Il nostro storico della sabbia ha immaginato che a innescare il disastro sia stata la difficile condizione del mucchio a ovest. «Se solo le autorità occidentali ... fossero intervenute prima a togliere un po' di sabbia dal sito iniziale» afferma. Ma la sua, nella migliore delle ipotesi, è solo un'illusione di sapore consolatorio. Nessuna indagine svolta vicino al sito iniziale prima della valanga avrebbe rivelato insoliti segni premonitori. Se il mucchio in quel punto era ripido, lo era anche in molti altri nei quali la caduta di un granello non avrebbe prodotto nulla di rimarchevole. Per prevedere il disastro il nostro storico avrebbe dovuto conoscere perfettamente la distribuzione dei granelli nell'intero mucchio e avere una capacità quasi illimitata di calcolare le conseguenze della caduta di uno di essi in ogni possibile punto. Solo in quel caso avrebbe potuto dire

con sicurezza: «Se un singolo granello cadesse nel sito a rischio del versante ovest, si verificherebbe senza dubbio una catastrofe terribile».

Inoltre, per quanto sia forse vero che togliere anche un solo granello dal sito iniziale avrebbe impedito il disastro, non si sarebbe potuto sapere in anticipo quali granelli si sarebbero dovuti spostare e in quale direzione. Se le autorità occidentali ne avessero rimossi alcuni, sarebbero rimaste costernate, qualche settimana dopo, vedendo un altro granello in un altro sito provocare una valanga catastrofica proprio a causa dei granelli spostati. In quel caso lo storico le avrebbe accusate non di non essere riuscite a prevenire la calamità, ma di averla direttamente prodotta.

Purtroppo lo storico può solo riferire di specifiche catene di eventi e non è in grado di capire il processo alla loro origine. Con la sua cronaca, descrive unicamente la strana contingenza della storia, senza chiarire perché le valanghe non siano tutte piccole e a volte provochino immani disastri. Per comprendere come mai un singolo granello possa scatenare un cataclisma, bisognerebbe comprendere la struttura complessa non solo di una ristretta regione del mucchio, ma dell'intera superficie, e per giunta conoscere le lunghe dita di instabilità che la percorrono. Solo così lo studioso riuscirebbe a farsi un'idea compiuta della storia e a capire da un lato ciò che accadde, dall'altro perché un fenomeno con quelle caratteristiche generali fosse destinato ad accadere e, chiaramente, a ripetersi.

Nel caso della storia umana, niente naturalmente ci costringe a una cronaca pedantesca di quanto accade. Ma in che modo possiamo giungere ad afferrare i sottili meccanismi che governano gli eventi?

Oltre la cronaca

Leopold von Ranke, grande storico tedesco dell'Ottocento, fu il primo a riassumere il senso della narrazione quando disse che il compito dello storico era semplicemente mostrare come le cose erano andate (*wie es eigentlich gewesen*).[6] Alcuni suoi

colleghi giudicarono un simile obiettivo insufficiente. Quarant'anni fa Edward Hallett Carr, storico dell'università di Oxford, lamentò:

> Tre generazioni di storici tedeschi, inglesi e perfino francesi entrarono in battaglia al suono delle fatate parole, simili a una formula magica, *wie es eigentlich gewesen*, volte, come la maggior parte delle formule magiche, a risparmiar loro la noiosa necessità di pensare con la propria testa.[7]

Secondo Carr lo studio della storia non consiste tanto nel descrivere eventi specifici, quanto nel trarre da essi generalizzazioni:

> L'uso stesso della lingua obbliga lo storico, come lo scienziato, alla generalizzazione. La guerra del Peloponneso e la seconda guerra mondiale furono molto diverse tra loro, ed entrambe uniche e irripetibili: eppure lo storico parla in entrambi i casi di guerre, e a protestare stanno solo i pedanti. Allorché Gibbon definì tanto l'affermarsi del cristianesimo quanto la nascita dell'Islam «rivoluzioni», comprese due eventi irripetibili sotto il segno di un'unica generalizzazione. Gli storici moderni fanno lo stesso allorché parlano delle rivoluzioni inglese, francese, russa e cinese. In realtà, lo storico non ha a che fare con ciò che è irripetibile, ma con ciò che, nell'irripetibile, ha un carattere generale.[8]

Che cosa c'è, dunque, di generale nell'unico? Quali sono le generalizzazioni ricavabili dalla storia? Lo studioso ne potrebbe elencare senza dubbio parecchie, ma una delle più evidenti e importanti fu indicata oltre mezzo secolo fa dallo storico americano Conyers Read, secondo il quale dalla storia si apprendeva una lezione fondamentale:

> Se non manteniamo una continua, vigile consapevolezza della necessità di una costante ricalibratura, creiamo una condizione di disagio che prelude inevitabilmente alla rivoluzione, sia questa destinata ad assumere la forma russa o la forma italiana ... Credo che lo studio della storia debba svolgere quest'importante funzione sociale.[9]

In altre parole, l'accumulo di una tensione interna, il «disagio» di Read, precederebbe ogni sconvolgimento rivoluzionario. O, come osservò Thomas Carlyle riguardo alle origini della rivoluzione francese:

> La fame, la miseria, l'oppressione sancita dalla legge che gravavano su venticinque milioni di cuori: furono queste cose, e non l'aver ferito la

vanità o polemizzato con la filosofia degli avvocati filosofeggianti, dei ricchi mercanti o della nobiltà rurale, a scatenare la Rivoluzione francese; e in ogni rivoluzione, e in qualsiasi paese, sarà sempre così.[10]

Secondo gli storici, il disagio è la precondizione della rivoluzione e precede fatalmente ogni cambiamento improvviso e drammatico in tutte le comunità, indipendentemente dal loro carattere e dalle loro dimensioni.[11] Implicita nel discorso è anche l'idea che il disagio sia abbastanza grande da superare quella che un altro storico definisce «la più grande delle forze sociali: l'inerzia».[12] È evidente che le rivoluzioni non scoppiano tutti i giorni, anche se in tutte le società vi sono elementi che non approvano l'ordine esistente.

Tale generalizzazione potrà sembrare così vaga e scontata da suonare priva di significato. Ma è interessante e stimolante metterla a confronto con la fisica del mucchietto di sabbia. Si forma una valanga solo quando il pendio diventa così ripido che la caduta del granello successivo fa superare al mucchio la soglia oltre la quale la sabbia comincia a rotolare giù. Allo stesso modo, nella crosta terrestre la tensione equivalente al disagio si accumula nelle rocce sinché queste all'improvviso cedono, provocando un terremoto. Se la generalizzazione indicata da Read è davvero universale, non è del tutto peregrino supporre che le rivoluzioni, le guerre e altri drammatici avvenimenti siano fenomeni intrinseci di un processo storico organizzato criticamente.

Torneremo su quest'ipotesi nel prossimo capitolo, ma prima di tuffarci nel fiume impetuoso dell'intera storia umana sarà opportuno immergersi per breve tempo in uno dei suoi più esili torrenti: la storia della scienza. Se l'insieme della storia umana ha un carattere generale, tale carattere si dovrebbe osservare in tutti i suoi sottoinsiemi. Negli anni Sessanta lo storico della scienza Thomas Kuhn pubblicò un libro che fece epoca e che rivoluzionò di colpo le teorie vigenti sul lavoro degli scienziati. Come vedremo, Kuhn sostenne che, in campo scientifico, l'accumulo universale della tensione e la successiva liberazione di «energia» avevano una notevole influenza sul ritmo e sul carattere della storia. Se vogliamo cominciare a comprendere le cause delle guerre e delle rivoluzioni politi-

che, forse ci converrà esaminare prima ciò che sta alla base delle rivoluzioni scientifiche.

Scienza e paradigmi

Alla fine del XIX secolo la scienza viveva ancora nell'età dell'innocenza. Molti erano convinti che gli scienziati avessero la capacità quasi sovrumana di essere razionali, lungimiranti e obiettivi, e che seguissero principi scientifici infallibili. L'idea più diffusa era che formulassero ipotesi sul funzionamento dei fenomeni, le verificassero attraverso esperimenti concreti, reputassero valide solo quelle che «quadravano con i fatti» e scartassero senza alcun rimpianto, come fossero spazzatura, tutte le altre.

Che la scienza consista nel formulare ipotesi, nel verificarle e nel formarsi convinzioni sulla base del dialogo con la natura è senza dubbio vero; come è vero che essa non consiste nell'accettare supinamente quanto proclamato da qualsivoglia autorità. «Scienza» disse una volta Richard Feynman «significa credere nell'ignoranza degli esperti»; e, si potrebbe aggiungere, nella possibilità di diventare un po' meno ignoranti attraverso indagini accurate. Tuttavia sarebbe grossolanamente ingenuo pensare che gli scienziati siano degli automi guidati dalla Santissima Trinità della razionalità, dell'obiettività e della lungimiranza. Sono comuni esseri umani e, poiché agiscono all'interno di una comunità (quella di tutti coloro che conducono ricerche), si influenzano a vicenda. Negli anni Cinquanta diversi storici cominciarono a capire che le influenze reciproche avevano conseguenze importanti.

Studiando a fondo la storia del *modus operandi* della scienza, lo storico Michael Polanyi arrivò per esempio alla conclusione che gli scienziati non erano così razionali e obiettivi come avrebbero voluto far credere:

> Vi è sempre, in qualsiasi tempo, una visione scientifica della natura delle cose che prevale ed è universalmente accettata ... È diffusa in ogni epoca la forte convinzione ... che qualunque dato contraddica l'idea dominante non sia valido e che, anche se non si riesce a spiegarlo, vada scartato nella speranza che risulti falso o irrilevante.[13]

Polanyi scoprì che, invece di essere sempre lungimiranti, gli scienziati erano sovente miopi e di corte vedute; invece di cercare prove per verificare le ipotesi, spesso, se contraddicevano le loro teorie, le ignoravano anche quando erano evidenti.

All'università di Harvard, Thomas Kuhn studiò a lungo gli sviluppi più importanti della scienza, come le rivoluzioni prodotte da Copernico e, successivamente, dalla teoria della relatività e dalla meccanica quantistica. Osservò che gli scienziati non avevano scartato immediatamente le vecchie teorie quando, davanti al tribunale dei fatti, queste erano risultate manchevoli sotto il profilo razionale e obiettivo; anzi, in qualsiasi epoca, si erano mostrati emotivamente legati a un corpus teorico condiviso che non avevano affatto rinnegato, se non quando il «disagio» prodotto dall'inadeguata descrizione della natura non aveva assunto proporzioni intollerabili.

A posteriori non dobbiamo stupirci di tale atteggiamento. Dopotutto, gli scienziati non sono superuomini e anche nel momento in cui fanno scienza non sono molto diversi da tutti gli altri esseri umani. Hanno i pregiudizi e le miopie di tutti noi e spesso vorrebbero che il mondo fosse in un modo piuttosto che in un altro. Ciò non significa naturalmente che la scienza non funzioni, tutt'altro: ha l'aria di funzionare benissimo. Che tipo di struttura ha, allora, e come riesce a progredire se gli scienziati sovente si rifiutano di abbandonare le teorie che prediligono? Intenzionato, come Carr, a ricavare generalizzazioni dalla storia, Kuhn decise di rispondere a tali interrogativi e lo fece in *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (1962), un saggio divenuto ormai un classico.

Al centro della sua analisi della struttura della scienza pose il concetto di «paradigma», cioè di un modello scientifico ben funzionante a livello sia teorico sia pratico:

> Con la scelta di questo termine ho voluto far presente il fatto che alcuni esempi di effettiva prassi scientifica riconosciuti come validi – esempi che comprendono globalmente leggi, teorie, applicazioni e strumenti – forniscono modelli che danno origine a particolari tradizioni di ricerca scientifica con una loro coerenza.[14]

Per esempio le equazioni di Newton e le loro applicazioni matematiche al moto dei pianeti sono un paradigma. Ne tro-

veremo un altro nelle equazioni di Maxwell relative all'elettromagnetismo e nella loro applicazione pratica alla trasmissione di radioonde, al funzionamento dei generatori elettrici e così via. La teoria quantistica, con tutto quanto implica, è un altro paradigma su cui oggi fanno quotidiano assegnamento migliaia di fisici. Insomma potremmo definire il paradigma un insieme di «buone idee» che permettono agli scienziati di spiegare alcuni fenomeni apparsi in precedenza inesplicabili.[15] Senza di esso i ricercatori affogherebbero nell'incredibile mare dei fenomeni naturali e non riuscirebbero a distinguere gli eventi importanti da quelli irrilevanti. Nel corso dei loro studi, gli scienziati apprendono diversi paradigmi e quindi imparano attraverso gli esempi come si fa scienza. I modelli teorici insegnano loro di che cosa sia composto l'universo (atomi, onde, campi della teoria quantistica ecc.) e descrivono il comportamento fondamentale degli elementi in gioco. In questo modo rendono in buona parte meccanico il processo scientifico; il paradigma rappresenta le fondamenta, sicché gli scienziati vi si sentono legati profondamente.

L'insieme di tutti i paradigmi scientifici forma quindi una sorta di rete di buone idee che si coagulano e si fissano perché tutti i ricercatori le sostengono. I paradigmi che saltano maggiormente agli occhi sono quelli che fungono da base: la teoria quantistica, la teoria evoluzionistica e via dicendo; ma ve ne sono molti di minor rilevanza che fanno sempre parte della rete, sono stati regolarmente verificati e indicano magari il metodo migliore per risolvere certe equazioni o la procedura sperimentale più adatta a ottenere certi risultati. Il corpus di tali modelli teorici costituisce la struttura portante della scienza, la «visione scientifica della natura delle cose che prevale ed è universalmente accettata», come diceva Polanyi.

Tuttavia l'obiettivo principale resta quello di accrescere la conoscenza, ovvero di rendere la rete di buone idee più fitta e completa. Se la scienza consiste nell'apprendere, la rete non può restare immutata e Kuhn osservò che vi erano sostanzialmente due modi (contrastanti) di produrre mutamenti al suo interno.

La scienza normale e i cambiamenti di paradigma

Anche se un assortito insieme di teorie fa apparire il mondo razionalmente comprensibile, non è semplicissimo verificare se ogni minimo fenomeno sia interpretabile alla luce di quanto è già noto. Molti fisici, per esempio, stanno attualmente cercando di risolvere l'enigma della fonoluminescenza, un fenomeno strano ma facilmente dimostrabile, che si produce quando un suono ad alta frequenza rende l'acqua luminescente. Benché lo si conosca da decenni e da decenni resti insoluto, tutti presumono, forse correttamente, che sia dovuto a un insieme di fattori, come l'interazione chimica, la meccanica quantistica e la fisica dei fluidi. In altre parole, ogni fenomeno, anche quando non è del tutto chiaro, viene interpretato alla luce delle teorie esistenti, a cui tutti gli scienziati credono e a cui si rivolgono per ampliare la loro gamma di conoscenze.

Kuhn chiamò tale approccio «scienza normale»: una volta che si sia acquisito un paradigma, la scienza normale saggia e verifica le sue conseguenze e la sua applicabilità, producendo un'evoluzione lineare e limitata. È una scienza assai conservatrice, perché non mette mai in discussione le «buone idee» dei vari paradigmi, ma dà per scontato che la visione comune dei fenomeni sia la chiave per interpretare praticamente tutto. Osserva Kuhn a proposito di questo tipo di scienza:

> Un'attività del genere ... sia come è stata fatta nel corso della storia, sia come è condotta nei laboratori contemporanei, si presenta come un tentativo di forzare la natura entro le caselle prefabbricate e relativamente rigide fornite dal paradigma. Il compito della scienza normale non è affatto quello di scoprire nuovi generi di fenomeni; anzi, spesso sfuggono completamente quelli che non si potrebbero adattare all'incasellamento.[16]

Il lavoro scientifico «normale» mira a estendere sempre di più il numero dei fenomeni naturali interpretabili in base alle teorie vigenti, a colmare le lacune e in genere a rendere il corpus teorico sempre più completo e compatto.

Ma la scienza non resta sempre e comunque normale. Mentre si cerca di allargare la rete delle conoscenze o di riempire regioni ancora vuote, si scopre a volte che alcuni fenomeni

«non si possono adattare all'incasellamento». O due o tre buone idee risultano incoerenti o diverse parti della rete non concordano tra loro. Tali problemi rappresentano una spina nel fianco per la scienza normale e creano un disagio che prepara il terreno a quello sconvolgimento che Kuhn definisce «rivoluzione scientifica».

Negli anni 1870-80 la scienza normale era talmente sicura delle leggi di Newton e della fisica classica che all'università di Monaco l'ordinario di fisica disse al giovane Max Planck: «Non è rimasto nulla da scoprire». Anche Lord Kelvin, il celebre fisico irlandese, dichiarò che «le future verità della scienza fisica» sarebbero state «solo ritocchi a livello di sesto decimale». Invece, nel giro di pochi anni, i teorici si accorsero che i principi della fisica classica portavano a una logica quanto sconvolgente conseguenza: tutti gli oggetti avrebbero dovuto emanare in continuazione una quantità infinita di luce, un'autentica assurdità definita «catastrofe ultravioletta». La maggior parte degli scienziati pensò che alla fine, in mano a un bravo ricercatore, l'enigma sarebbe stato risolto e la validità delle teorie classiche sarebbe stata confermata; ma dopo molti decenni di ripetuti fallimenti la situazione apparve ancora più inquietante, specie quando vari problemi non meno ostici produssero un forte disagio che condusse al punto di rottura.

Poiché di norma rappresenta il fondamento della ricerca, il paradigma, quando viene messo in discussione, induce inevitabile inquietudine. Negli anni 1920-30 il fisico Wolfgang Pauli, preoccupato per i problemi che si profilavano all'orizzonte nel suo settore di ricerca, scrisse:

> La fisica si trova ancora una volta in una situazione di estrema confusione. Mi pare in ogni caso troppo difficile per me, sicché rimpiango di non aver fatto l'attore comico o qualsiasi altro mestiere nel quale non l'avrei nemmeno sentita nominare.[17]

Quando finisce in un'impasse, però, la scienza normale offre agli scienziati delle opportunità. Poiché è conservatrice e considera il paradigma inalterabile, solo nel momento in cui il disagio raggiunge il culmine gli scienziati si decidono a metterla in discussione e a scartare alcune «buone idee» per rico-

struire le fondamenta da zero. Come rileva Kuhn, la struttura delle trasformazioni scientifiche si ripete costante:

> In questi e in altri modi ancora, la scienza normale va a finire ripetutamente fuori strada. E quando ciò accade – quando cioè la professione non può più trascurare anomalie che sovvertono l'esistente tradizione della pratica scientifica – allora cominciano quelle indagini straordinarie che finiscono col condurre la professione ad abbracciare un nuovo insieme di impegni, i quali verranno a costituire la nuova base della pratica scientifica. Gli episodi straordinari nel corso dei quali avviene questa sostituzione degli impegni vincolanti i membri della professione, sono indicati in questo saggio col nome di rivoluzioni scientifiche. In rapporto all'attività legata alla tradizione della scienza normale, essi sono gli elementi complementari che scuotono la tradizione.[18]

Nel caso della fisica degli anni Venti, furono Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger e Paul Dirac, stimolati dalle teorie già avanzate da Albert Einstein, Max Planck, Niels Bohr e Louis de Broglie, a rivoluzionare lo scenario intellettuale e a gettare le nuove fondamenta della meccanica quantistica. Dopo un simile mutamento epocale, gli scienziati acquisiscono un altro, solido paradigma di riferimento e torna a instaurarsi un periodo di scienza normale, anche se la rete di idee è stata radicalmente alterata. È significativo confrontare lo sconforto che trapelava dal brano di Wolfgang Pauli citato poc'anzi con la fiducia che il fisico austriaco mostrò sei mesi dopo, quando Heisenberg ottenne i primi risultati provvisori nell'elaborazione del nuovo paradigma quantistico:

> Il tipo di meccanica elaborato da Heisenberg mi ha ridato la speranza e la gioia di vivere. Certo non rappresenta la soluzione all'enigma, ma credo che adesso sia di nuovo possibile progredire.[19]

Progredire è l'obiettivo della scienza, anche se per la scienza normale è un marciare saldi e sicuri su un terreno familiare.

Riassumendo l'analisi di Kuhn, la scienza normale accresce e perfeziona il paradigma vigente senza procedere a revisioni sostanziali delle idee fondanti. Paradossalmente, però, questa «normalità» lascia infine emergere anomalie e incoerenze che conducono a un aumento della tensione interna; e quando il disagio raggiunge una certa soglia, il modello teorico condiviso, assieme alla scienza normale di cui è il supporto, si disgre-

ga. Gli scienziati scoprono allora di non poter più continuare a completare il paradigma, ma di doverlo in parte distruggere e ricostruire.

La ricostruzione non è mai isolata e a sé stante. Come accade nel caso della crosta terrestre, dove lo slittamento di alcuni blocchi modifica la tensione esercitata sulle rocce vicine scatenando un'ondata di ulteriore attività, la rielaborazione di una parte del paradigma comporta inevitabilmente delle modifiche nelle regioni vicine, queste a loro volta comportano altre modifiche altrove, e così via. La meccanica quantistica, per esempio, impose una revisione delle teorie che fino ad allora avevano descritto il comportamento dei solidi, dei liquidi e dei gas.

La dinamica delle rivoluzioni

L'analisi kuhniana della scienza ha avuto una risonanza enorme. Della *Struttura delle rivoluzioni scientifiche* ha scritto lo storico Peter Novick:

> Nessun altro testo americano del XX secolo ha avuto una così grande influenza; tra i saggi storici non ha rivali.[20]

Forse l'influenza è dovuta al fatto che Kuhn non si limitò alla mera descrizione, ma produsse una generalizzazione di ampia applicabilità. Nella tensione tra le modalità di cambiamento «legate alla tradizione» e quelle «che scuotono la tradizione», egli riconobbe l'elemento chiave di un processo storico profondo. Ma non conosceva la fisica matematica che avrebbe potuto permettergli di comprendere fino a che punto fosse profondo e universale quel processo. Se gli elementi fondamentali del modello kuhniano ci appaiono familiari, non c'è da stupirsi: sono incredibilmente simili a quelli che stanno alla base della dinamica dei terremoti.

Il lento spostamento delle placche continentali non produce direttamente una riorganizzazione della crosta terrestre, perché l'attrito mantiene le rocce al loro posto; tuttavia la tensione che si esercita sui blocchi aumenta a causa di tale spostamento e quando supera una certa soglia, le zolle scivolano e si

riorganizzano in maniera improvvisa e violenta. Anche la scienza normale provoca un accumulo di tensione nel paradigma vigente. Come osservò Michael Polanyi, nella comunità degli scienziati si registra una sorta di «attrito mentale» che diventa sempre più forte, finché, superato un determinato livello, provoca una rivoluzione scientifica.

La scienza normale sarebbe quindi simile al lento spostamento delle placche, mentre le rivoluzioni scientifiche sarebbero l'equivalente dei terremoti. Ma l'analogia può spingersi oltre. Come sappiamo, i terremoti non hanno dimensioni tipiche. I due blocchi rocciosi che scivolano producono un aumento della tensione esercitata sulle rocce vicine e causano ulteriori slittamenti; e poiché la crosta terrestre è per sua natura organizzata nello stato critico, non si può prevedere fin dove porterà la catena di slittamenti. È possibile che, come non c'è un terremoto tipico, così non ci sia una rivoluzione scientifica tipica?

Ai nomi di Albert Einstein, Isaac Newton, Charles Darwin e Werner Heisenberg associamo le grandi rivoluzioni «telluriche» della scienza. Ma nel 1969, nel poscritto a una nuova edizione di *La struttura delle rivoluzioni scientifiche,* Kuhn osservò che le rivoluzioni non riguardavano necessariamente i principi fondamentali e non avevano necessariamente conseguenze di grande portata. Anche un piccolo sottosettore della fisica e anche pochi scienziati di un solo gruppo di ricerca possono cambiare radicalmente il modello teorico che rappresenta la base del loro lavoro. Se le idee a cui faceva riferimento in precedenza danno sempre meno risultati, un'équipe di limitate dimensioni può benissimo vivere la sua rivoluzione paradigmatica:

> In parte a causa degli esempi che ho scelto e in parte a causa della mia genericità circa la natura e le dimensioni delle comunità rilevanti, alcuni lettori di questo libro hanno tratto la conseguenza che il mio interesse sia rivolto principalmente o esclusivamente alle principali rivoluzioni scientifiche come quelle associate ai nomi di Copernico, Newton, Darwin o Einstein. ... Una rivoluzione è, per me, una specie molto particolare di cambiamento che comporta una sorta di ricostruzione dei dogmi condivisi dal gruppo. Ma non deve essere necessariamente un grande cambiamento, né deve necessariamente apparire rivoluzionario a

coloro che sono al di fuori di una singola comunità, la quale consiste forse di meno di venticinque persone. È proprio perché questo tipo di cambiamento, poco riconosciuto o discusso nella letteratura della filosofia della scienza, si verifica così regolarmente su scala così ridotta, che è assolutamente necessario intendere che cosa sia un cambiamento rivoluzionario in contrasto con un cambiamento cumulativo.[21]

Secondo Kuhn, dunque, ciò che distingue una rivoluzione dalla scienza normale è il carattere antitradizionale della prima e il carattere conservatore della seconda. Ribadiamo ancora una volta che la rivoluzione distrugge in parte il paradigma, mentre la scienza normale lo amplia. L'analisi kuhniana lascia capire che non esiste una rivoluzione tipica, che la dinamica della ricerca scientifica presenta forse invarianza di scala e che, come la crosta terrestre, il paradigma potrebbe trovarsi nello stato critico. Certo, sono solo ipotesi, perché le analogie non dimostrano niente. Ma dove si potrebbero trovare altre prove significative?

XIII
Tradizione e rivoluzione

> La scienza ... non può agire sulla base di un rigido trattato di non aggressione con il resto della società; né l'uno né l'altro fronte hanno confini difendibili.
>
> *John Krasher Price*[1]

> Nulla più della rivoluzione suscita interesse per la storia.
>
> *Edward Hallett Carr*[2]

È forse impossibile capire la matematica alla base di un fenomeno elusivo come i paradigmi della scienza. Se è possibile collocare delicati sensori sulle colline californiane per monitorare l'attrito o lo spostamento delle placche continentali lungo la faglia di San Andreas, è assai più difficile misurare la rete di idee scientifiche che pervade il mondo assai meno accessibile dei pensieri e dei ricordi degli scienziati. Eppure, a un certo punto della *Struttura delle rivoluzioni scientifiche,* Kuhn formulò quest'affascinante ipotesi:

> se ho ragione a ritenere che ogni rivoluzione scientifica alteri la prospettiva storica della comunità che ne fa esperienza, allora quel mutamento di prospettiva dovrebbe avere conseguenze sulla struttura dei manuali e delle pubblicazioni scientifiche del periodo postrivoluzionario. Un effetto come questo – una modificata distribuzione della letteratura tecnica citata nelle note a piè di pagina dei rapporti scientifici – dovrebbe essere studiato come un possibile indice del verificarsi di rivoluzioni.[3]

Kuhn non approfondì il discorso, ma non è difficile immaginare lo sviluppo dell'ipotesi. Lo scienziato assimila i principi della propria disciplina, sia questa la fisica delle particelle,

la genetica o la cosmologia, e quando pubblica una relazione cita una serie di testi che consentono agli addetti ai lavori di collocare le sue teorie nella rete locale di «buone idee» della disciplina in questione. Più o meno indirettamente, le citazioni collegano le relazioni di ricerca in maniera tale da indurle a rispecchiare la struttura del paradigma, anche se le singole idee, di per sé, vivono nell'atmosfera rarefatta della mente umana.

Le citazioni consentono di analizzare la natura dei cambiamenti nella rete teorica. Prendiamo come esempio i geofisici. Quando si verifica un terremoto, misurano la magnitudo del sisma con le onde dei sismogrammi e la magnitudo, a sua volta, riflette il grado di assestamento della struttura della crosta terrestre: i terremoti violenti producono un assestamento più estensivo del paesaggio di quelli lievi. Come sappiamo, proprio studiando i dati relativi alle magnitudo di molti terremoti Gutenberg e Richter trovarono la loro semplice legge della potenza, una legge da cui adesso siamo in grado di dedurre che le origini di macrosismi e microsismi sono essenzialmente le stesse. Il terremoto avviene quando i due blocchi rocciosi lungo un breve segmento di faglia cominciano a scivolare, ma quanto intenso sarà il sisma non dipende dall'evento in sé, bensì dal punto in cui avviene: potrebbe infatti comportare solo una limitata catena di slittamenti nelle rocce contigue oppure interessare una delle lunghe dita di instabilità che percorrono un esteso tratto di crosta.

Analogamente, ogni relazione scientifica è un insieme di idee che, nel momento in cui viene introdotto nel paradigma preesistente, provoca un piccolo o grande assestamento. Può trattarsi, per esempio, di una ricerca teorica come quella compiuta da Watts e Strogatz sui «piccoli mondi». La loro analisi individuava una connessione imprevista tra la teoria dei grafi e le proprietà peculiari delle reti sociali. L'ipotesi Watts-Strogatz ha apportato correzioni a credenze e campi di ricerca di altri scienziati. Alcuni hanno scritto e pubblicato analisi più elaborate delle proprietà matematiche dei «piccoli mondi», altri hanno cominciato a servirsi di modelli matematici per studiare la diffusione delle malattie; e così via.

È troppo presto per dire quant'altra attività scientifica la ricerca sui grafi di Watts e Strogatz incoraggerà, ma è probabile che molte delle relazioni ispirate al loro lavoro citeranno l'articolo originale sull'effetto piccolo mondo. Per calcolare dunque le dimensioni complessive del terremoto culturale prodotto da quella o qualsiasi altra relazione, potremmo considerare il numero di volte in cui essa viene citata dalle analisi successive. Una relazione che viene citata solo una volta induce ben poca riorganizzazione della rete di idee scientifiche, mentre una che viene citata un migliaio di volte ne induce parecchia.

È certo un modo piuttosto rozzo di misurare l'effetto finale di una nuova teoria, però potremmo porci una domanda simile a quella che si posero Gutenberg e Richter: qual è il numero tipico di citazioni prodotto da una relazione? In altre parole: quando appare una teoria nuova quali sono le dimensioni tipiche del terremoto culturale che provoca?

L'eco della stampa

Per fortuna è facile ripercorrere la storia di una teoria basandosi sull'eco che ha avuto sulla stampa. Il Science Citation Index elenca tutti i documenti in cui è stata citata qualsiasi relazione scientifica pubblicata dagli anni Sessanta in poi. Se per esempio prendiamo un articolo sulla teoria quantistica dei campi pubblicato nel dicembre del 1967, potremo facilmente scoprire chi da quella data in avanti l'ha citato. Nel 1998 il fisico Sidney Redner, dell'università di Boston, condusse una ricerca del genere su un campione di ben 783.339 articoli usciti nel 1981. Naturalmente bisogna analizzare le relazioni pubblicate qualche anno prima della data «d'arrivo» scelta, per lasciare a quelle destinate a essere molto citate il tempo di acquisire risonanza; è infatti chiaro che, se non si procedesse così, le cifre non darebbero la misura delle reazioni suscitate.

Esaminando i dati relativi alla sua rosa di articoli, Redner scoprì anzitutto una verità piuttosto triste: ben 368.110 relazioni non erano state menzionate nemmeno una volta, sicché le idee che esponevano non avevano avuto la minima risonanza. Studiando invece le relazioni che avevano destato più interes-

se, trovò qualcosa di interessante. Nel caso degli articoli citati più di cento volte, la distribuzione delle citazioni seguiva una legge della potenza invariante di scala: proprio quel che sarebbe stato logico aspettarsi se la rete delle idee fosse stata organizzata nello stato critico come i modelli del mucchietto di sabbia o della crosta terrestre. Gli articoli che avevano molta risonanza erano ovviamente meno numerosi di quelli che ne avevano poca. Ma Redner scoprì che il rapporto tra numero di citazioni e frequenza degli articoli era assai regolare: al raddoppiare delle prime, i secondi diventavano otto volte più rari (*figura 22*). Dunque non c'è un numero tipico di citazioni per gli articoli scientifici e, per estensione, nessuna dimensione tipica della riorganizzazione di idee cui qualsivoglia nuova teoria conduce.[4] Che cosa significa tutto questo?

In precedenza, quando abbiamo analizzato le estinzioni di

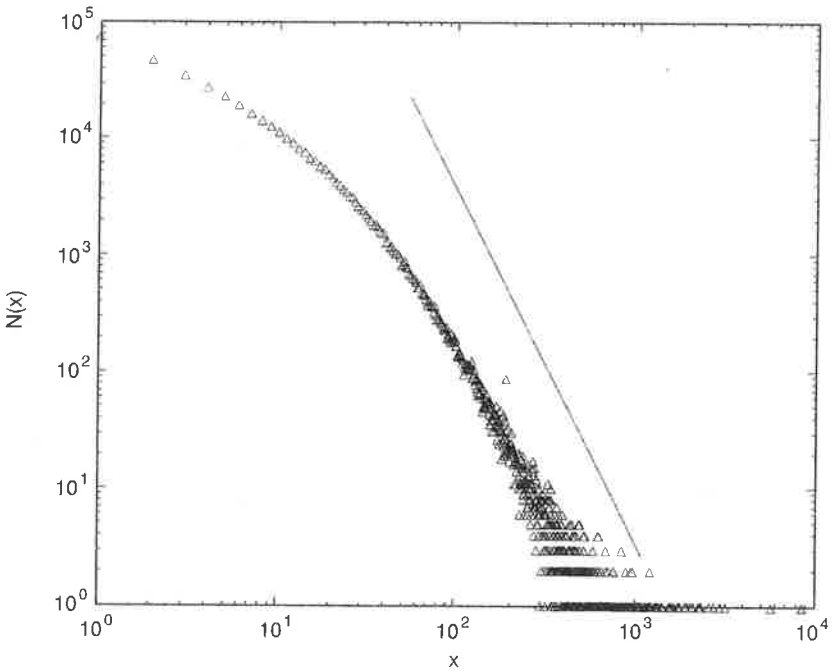


Figura 22. Distribuzione delle relazioni scientifiche in base al numero di citazioni. (Adattamento di un'immagine tratta da Sidney Redner, «European Physics J.B., 1998, 4, pp. 131-34. Riproduzione autorizzata.)

massa, abbiamo visto che spiccavano rispetto a quelle normali e all'apparenza avevano origini assai diverse, come pesanti influenze esterne del tutto estranee al normale meccanismo evolutivo all'origine delle estinzioni comuni. Abbiamo però anche visto che la differenza era solo illusoria e lo stesso abbiamo constatato nel caso dei terremoti: per quanto tendiamo a pensare che all'origine dei macrosismi vi siano cause speciali, la legge di Gutenberg-Richter ci spiega che non è così. Alla luce dei dati controllati da Redner, pare di capire che le medesime conclusioni si possano trarre riguardo al funzionamento della scienza. Quando Kuhn osservò che le rivoluzioni potevano essere sia grandi sia piccole e che le une e le altre avevano in sostanza lo stesso carattere «eversivo» rispetto al paradigma, non poté aggiungere prove a sostegno della sua tesi. Ma la legge della potenza individuata da Redner nel campo delle citazioni è una sorta di legge di Gutenberg-Richter dei terremoti scientifici e ci avverte che, in sostanza, non vi è reale distinzione tra rivoluzioni piccole e grandi.

Assieme a questo importante concetto, la cruciale analisi di Kuhn lascia pensare che, come la crosta terrestre e molti altri sistemi, la struttura della conoscenza scientifica sia organizzata in uno stato critico. Se le cose stessero davvero così, gli scienziati dovrebbero aspettarsi l'inaspettato, perché la struttura delle idee sarebbe organizzata in maniera da consentire a una minima scoperta casuale di scatenare, in qualsiasi momento e senza preavviso, una reazione a catena capace di produrre una grande rivoluzione. Prevedere simili rivoluzioni sarebbe impossibile, perché le conseguenze finali di una nuova teoria dipenderebbero non tanto dalla sua importanza intrinseca, quanto dal punto della rete di idee in cui si trovasse a «cadere».

Comunemente si associa il nome di Albert Einstein a una delle più grandi rivoluzioni scientifiche della storia. Ma tutto iniziò quando Einstein cominciò a riflettere su una strana caratteristica delle equazioni di Maxwell relative all'elettromagnetismo: quelle semplici equazioni, scoprì, non gli permettevano di immaginare d'essere a cavallo di un'onda di luce e di studiarla come fosse ferma. Fu quel piccolo paradosso teorico,

poco più di una curiosità, a indurlo a rivoluzionare secoli di fisica classica con la teoria della relatività, teoria che alla fine, attraverso molteplici strade, avrebbe portato all'energia nucleare e alla bomba atomica.

È facile rinvenire esempi analoghi. Nel 1900 Planck elaborò una formula che descriveva la radiazione emessa da un corpo incandescente che assorbisse la luce senza rifletterla; e per arrivare a tale risultato dovette ipotizzare che, quando la luce interagiva con la materia, l'energia viaggiasse dall'una all'altra solo in piccoli pacchetti discreti, i «quanti». All'epoca ritenne la sua ipotesi di lavoro solo un comodo espediente tecnico che forniva la risposta giusta magari per la ragione sbagliata; né lui né gli altri fisici si resero conto che quella «trovata» sarebbe risultata fatale all'intero campo di ricerca e avrebbe condotto all'incredibile rivoluzione della meccanica quantistica, con la quale si sarebbe passati dalla fisica classica alla fisica moderna.

Viste attraverso la lente dello stato critico, le grandi rivoluzioni non presentano origini speciali: sono soltanto le implicite, sensibili fluttuazioni di un sistema autorganizzato nella criticità.

Il mucchietto di sabbia della scienza

Con questo non voglio certo dire che alcuni scienziati non siano più brillanti di altri, che Einstein avesse un'intelligenza media o che la teoria della relatività ristretta pubblicata nel 1905 non fosse niente di speciale. Finora ho descritto le valanghe che attraversano la rete di ipotesi scientifiche spostandosi da una mente all'altra; ma si formano valanghe anche all'interno delle singole menti, per esempio quando un individuo ha un'idea, capisce che quest'idea influisce su altre e riesce a elaborare un quadro coerente del suo effetto, magari scoprendo lungo la strada ulteriori effetti di ulteriori idee. Vale la pena ricordare la descrizione fatta da Lars Onsager della sua ricerca sul modello del magnete bidimensionale:

> Era il tipo d'indagine in cui si parte da una buona intuizione e si sente di doverla seguire a ogni costo; e lungo la strada ecco che se ne ha

un'altra ... e insomma le intuizioni si susseguono senza soluzione di continuità, tutte troppo buone per essere scartate.[5]

Così, per esempio, la rivoluzione relativistica iniziò quando Einstein cominciò a riflettere sulla peculiarità delle equazioni di Maxwell; ma la valanga prodottasi nella sua mente fece molta strada prima di venire trasmessa ad altre menti. Forse nessun altro avrebbe percorso da solo una strada lunga come quella che percorse lui. Si potrebbe quindi supporre che, per uno scienziato, la grandezza consista non tanto nell'avere idee straordinarie capaci di rivoluzionare la scienza, quanto nel comprendere quali idee possano essere rivoluzionarie e nel trasformare la loro potenzialità in realtà. Nella crosta terrestre le rocce scivolano da sole, spinte dall'enorme tensione accumulatasi su di esse. Nel mucchietto di sabbia è la gravità a far rotolare i granelli. Ma i cambiamenti scientifici sono prodotti solo dal duro lavoro dei ricercatori. Il grande scienziato sa capire quali ipotesi hanno, in nuce, la capacità di produrre una colossale reazione a catena e possiede il cervello e l'energia per descrivere la cascata di implicazioni.

Che cosa possiamo dedurre da tutto ciò? Nel XIX secolo fare scienza era considerato un processo affine alla costruzione di una grande torre del sapere: ciascuno scienziato faceva parte di un esercito di costruttori e, portando i suoi piccoli mattoni a un edificio sempre più alto, li collocava nella posizione giusta. L'analisi storico-filosofica di Kuhn ha dimostrato che simile visione era troppo semplicistica. La scienza non cresce per mera aggregazione; anzi, a volte, al momento di essere deposto, un nuovo mattone rivela l'esistenza di tali lacune nell'architettura esistente che gli scienziati sono costretti a distruggere e ricostruire una parte dell'edificio prima di poter ricominciare.

Grazie alla legge della potenza individuata da Redner, adesso siamo in grado di definire meglio il processo scientifico. Qualunque ipotesi venga formulata da un teorico e qualunque osservazione venga fatta da uno sperimentatore somigliano a granelli che cadono sul mucchietto di sabbia della conoscenza. Il nuovo granello può accrescere il mucchio aggiungendosi alla

struttura oppure esercitare una tale tensione su una certa area da far rotolare giù le idee. A loro volta, le frane possono fermarsi subito o diventare sempre più grandi: come risulta evidente dalla legge della potenza indipendente dalla scala riguardante le citazioni, le valanghe non hanno una dimensione tipica prevedibile. Le rivoluzioni di minor entità scoppiano ogni giorno, coinvolgono pochi scienziati di piccoli gruppi e sono in pratica invisibili a quasi tutti gli altri, proprio come gli impercettibili microsismi che avvengono in continuazione senza che noi ce ne accorgiamo. Le rivoluzioni di maggior entità, invece, inficiano gran parte delle teorie elaborate fino ad allora e possono accadere in qualsiasi momento se l'idea giusta emerge nel posto giusto.

All'inizio del capitolo precedente ho esaminato le carenze del metodo descrittivo per la comprensione dei fenomeni nei quali la storia ha un ruolo importante. Ogniqualvolta domina la contingenza, anche un episodio minimo può determinare una serie di avvenimenti imprevedibili, sicché quando si cerca di illustrare il corso di complesse catene di eventi non si può ricorrere a leggi semplici e deterministiche. Ciò vale tanto per la storia umana quanto per i terremoti o per il mucchietto di sabbia. In questi ultimi due casi, però, vi sono altre considerazioni da fare. Sappiamo che i due fenomeni sono caratterizzati dallo stato critico, che si rispecchia in leggi statistiche di straordinaria semplicità: le leggi della potenza indipendenti dalla scala che sottendono una profonda ipersensibilità intrinseca del sistema e l'impossibilità di prevedere le dimensioni dell'evento successivo. Se dunque in tali sistemi le catene di eventi non sono prevedibili, non si può però dire che *niente* sia prevedibile, perché nella regolarità statistica che emerge nel corso di molte catene di eventi possiamo sperare di riconoscere le leggi dei processi storici.

Tali leggi definiscono le proprietà generali non di una, ma di molte narrazioni, e rispecchiano così il carattere del fondamentale processo storico alla base delle singole catene di eventi. Inoltre, particolare notevole, sono alla radice della dinamica storica della scienza. Nel metodo di lavoro degli scienziati, nell'interazione e nella genesi delle idee scientifiche si

osserva un'organizzazione spontanea che consente a minime cause iniziali di amplificarsi oltre misura. La legge dei terremoti culturali mostra quanto sia facile la «propagazione» delle influenze anche se queste sono, come nel caso specifico, eteree e pure come le idee.

Certo, le idee hanno peso non solo in campo scientifico. Ogni area dell'attività umana, dal teatro alla pianificazione urbana, ha il proprio ecosistema di buone idee interagenti (che include la pratica, la tecnica e così via). Il fenomeno interessa i settori più disparati: arte, moda, musica ecc. Quando emerge, la nuova concezione non si inserisce nella struttura preesistente senza produrre un piccolo (o grande) terremoto. È lecito aspettarsi che in quasi tutti i campi le idee evolvano secondo leggi statistiche e frequenze analoghe a quelle osservabili in ambito scientifico. Ci saranno periodi in cui la situazione appare «normale» e sembra che tutto sia già stato fatto e scoperto; ma a un certo punto una minima correzione apportata a un concetto collaudato, una correzione che all'inizio pareva insignificante, provoca un'ondata crescente di revisionismo che finisce per trasformarsi in una rivoluzione di proporzioni globali.

Volendo osare ancora di più nelle nostre ipotesi, potremmo aspettarci di trovare la legge della potenza che rappresenta la «firma» della criticità nel grande fiume dell'intera storia umana.

Umano, troppo umano

Quando gli chiesero quali fossero a suo avviso le qualità più importanti per un giovane che aspirasse alla carriera politica, Winston Churchill, allora primo ministro del Regno Unito, rispose:

> La capacità di prevedere che cosa succederà domani, il mese prossimo e l'anno prossimo; e la capacità, in seguito, di spiegare perché quanto era stato previsto non è accaduto.[6]

La storia, naturalmente, è imprevedibile: su questo convengono tutti i politici e gli storici. Però tutti convengono anche

che il corso delle vicende umane non s'inverte e non smarrisce completamente la direzione senza buoni motivi. Quando scoppia una guerra o un paese precipita nel caos di una rivoluzione o di una grave recessione economica, gli storici cercano di analizzare le cause, convinti che siano individuabili come quelle di una malattia fisica; e, sebbene difficilmente concordino su di esse (come abbiamo visto nel XII capitolo a proposito della prima guerra mondiale), hanno in genere un obiettivo di ricerca comune.

D'altronde, la sconsolata alternativa è che il mondo possa esplodere per nessun valido motivo e che, anche quando il cielo appare sereno, forze perlopiù invisibili tramino nell'ombra per indebolire la struttura di una società o la rete di relazioni internazionali, favorendo così le calamità. All'inizio del saggio, però, ho spiegato che la fisica teorica sta cominciando a fornirci indizi sulla natura turbolenta della storia e, in particolare, sul motivo per cui è sconvolta in maniera irregolare ma frequente da gravi e imprevedibili terremoti. Chiunque abbia seguito fino ad ora le argomentazioni di questo libro forse avrà ormai compreso perché le cose stiano così. Per avvicinarci ancora di più al tema della storia umana in generale, converrà fare qualche altra osservazione sull'immagine che Kuhn elaborò della scienza, un'immagine che si basava su una profonda comprensione della natura umana.

Il maggiore risultato da lui ottenuto fu dimostrare che la scienza ha successo anche se, come tutti i comuni mortali, gli scienziati hanno limiti molto precisi. Lungi dall'essere perfette macchine ultrarazionali, essi lottano con i propri pregiudizi, le proprie cieche ambizioni, le proprie tendenze e paure, spinti da una brama di certezza tipicamente umana. Nel paradigma trovano una struttura logica che consente di capire una parte del mondo e che rappresenta una base intellettuale a cui attenersi fedelmente; ma quando le discrepanze e le incoerenze diventano troppo forti, sono costretti a rompere con la tradizione e a correggere alcune delle teorie ritenute fino ad allora più valide.

Questo non basta a generare uno stato critico e una legge della potenza per le rivoluzioni scientifiche; ma la legge della

potenza individuata da Redner ci insegna qualcos'altro sulla natura delle rivoluzioni scientifiche. Nel modello del mucchietto di sabbia, quando una parte del mucchio diventa troppo ripida i granelli rotolano a valle, ma solo finché il pendio non ricomincia a trovarsi un poco sotto la soglia. In altre parole, pur riducendo la tensione la valanga conserva il mucchio nello stato critico e sull'orlo dell'instabilità e proprio questo, alla fine, fa sì che non vi sia una scala tipica per le valanghe. Lo stesso vale per la crosta terrestre, dove lo slittamento va avanti finché non si crea quel po' di attrito sufficiente ad arrestare di nuovo il processo.

Dalla legge della potenza relativa alle citazioni si deduce che un discorso approssimativamente analogo vale per la dinamica del pensiero scientifico. Quando sono costretti a modificare mattoni cruciali delle loro basi teoriche, gli scienziati non demoliscono sconsideratamente l'intero edificio, ma rifanno le fondamenta solo nella misura strettamente necessaria. Come il mucchietto di sabbia virtuale, la struttura delle credenze scientifiche è mantenuta in uno stato di tensione generale tale da avvicinarsi al punto di rottura, sicché una crisi anche piccola può, con «effetto domino», produrre una rivoluzione sproporzionata. In poche parole, è l'«attrito» intellettuale a mantenere salda la rete di idee ed è la curiosità intellettuale a sottoporla a tensione. Le due influenze sono contrarie, come lo sono da un lato la resistenza per attrito e dall'altro le inesorabili forze che tendono a spostare i due blocchi nelle linee di faglia. Ed è simile contrasto che conduce allo stato critico e alla legge della potenza relativa alle rivoluzioni.

Gli scienziati, naturalmente, non sono gli unici a bramare certezze e a non sopportare l'idea di affossare le loro teorie predilette. In questo sono del tutto umani, giacché un simile comportamento è archetipico: l'umanità si comporta così nei più svariati contesti. Ciò induce a pensare che Kuhn abbia in realtà descritto un andamento ciclico universale valido ben al di là del mondo scientifico. In effetti non è difficile, in campo storico, riconoscere lo stesso andamento anche altrove.

Civiltà e tensioni sociali

Come ho spiegato nel I capitolo, secondo lo storico Paul Kennedy i grandi cicli della civiltà umana che vedono protagoniste le grandi potenze sono in gran parte dovuti all'accumulo spontaneo e alla successiva liberazione delle tensioni indotte dagli interessi nazionali. Egli scrive infatti:

> La forza relativa delle nazioni dominanti negli affari mondiali non è mai costante, principalmente a causa dell'ineguale tasso di crescita tra le diverse società e i progressi tecnologici e organizzativi che possono avvantaggiare una società piuttosto che un'altra. Per esempio, l'avvento delle navi a vela oceaniche armate di cannoni e lo sviluppo del commercio atlantico dopo il 1500 non portarono uguali benefici a tutti gli stati d'Europa, ma ad alcuni più che ad altri. Analogamente, la successiva scoperta della forza vapore e l'utilizzo del carbone e di altri minerali incrementarono enormemente la potenza di certe nazioni, diminuendo quindi quella di altre.[7]

In seguito a tali trasformazioni spontanee, certi paesi cercano disperatamente di conservare un potere politico che le loro basi economiche non sono più in grado di sorreggere, mentre altri, arricchiti da una nuova forza economica, tentano di esercitare una maggiore influenza politica. La tensione inevitabilmente cresce, finché, magari in conseguenza di una crisi temporanea e in gran parte casuale, supera la soglia di rottura e viene liberata, di solito attraverso un conflitto armato; dopodiché ciascuna nazione torna ad avere un'influenza grossomodo corrispondente alla sua reale forza economica.

Un andamento abbastanza simile si riscontra nelle interazioni tra gruppi e individui all'interno dei paesi. Nessuna società è statica e immutabile: a mano a mano che cambia, per puro accidente storico certi gruppi diventano più potenti di altri e provocano problemi interni di vario tipo: economico, razziale e così via. Tutte le società hanno strutture connesse alle tradizioni (leggi, convenzioni sociali, divieti morali, gerarchie di classe) che mirano a conservare la stabilità e a comporre i contrasti tra i membri; ma sono strutture non sempre adeguate. Come non esiste solo la scienza normale, così non esiste solo la politica di governo. Fu Thomas Kuhn a paragonare i due settori:

> Le rivoluzioni politiche sono introdotte da una sensazione sempre più forte ... che le istituzioni esistenti hanno cessato di costituire una risposta adeguata ai problemi posti da una situazione che esse stesse hanno in parte contribuito a creare. In una maniera più o meno identica, le rivoluzioni scientifiche sono introdotte da una sensazione crescente ... che un paradigma esistente ha cessato di funzionare adeguatamente nella esplorazione di un aspetto della natura verso il quale quello stesso paradigma aveva precedentemente spianato la strada. Sia nello sviluppo sociale che in quello scientifico, la sensazione di cattivo funzionamento che può portare a una crisi è un requisito preliminare di ogni rivoluzione.[8]

Eppure, a causa del desiderio umano di stabilità – soprattutto quello di chi è al potere e trae maggior beneficio dall'ordine esistente – le istituzioni non cedono finché la conflittualità e lo scontento non superano una certa soglia. La gente fa la rivoluzione solo quando è talmente esasperata da non avere altra soluzione. Non protesta vibratamente contro leggi ingiuste se non nel momento in cui queste causano disagi insostenibili. Vale la pena ricordare di nuovo quanto ha detto lo storico americano Conyers Read, da me già citato nel XII capitolo:

> Se non manteniamo una continua, vigile consapevolezza della necessità di una costante ricalibratura, creiamo una condizione di disagio che prelude inevitabilmente alla rivoluzione, sia questa destinata ad assumere la forma russa o la forma italiana ... Credo che lo studio della storia debba svolgere quest'importante funzione sociale.

È una lezione, quella di Read, che hanno sicuramente imparato i dirigenti del dipartimento forestale del Wyoming, i quali adesso conoscono i benefici della costante ricalibratura spontanea della foresta indotta da incendi di piccole dimensioni. Impedire simili correzioni naturali dell'ecosistema ha conseguenze nefaste.

Beninteso, non è un campo, questo, di certezze matematiche. Né le «reti di relazioni internazionali» né le strutture sociali sono sistemi facilmente comprensibili; eppure è quasi indubbio che in entrambi si accumuli una qualche tensione. È anche probabile che la tensione non trovi sempre (e nemmeno spesso) modo di allentarsi attraverso le «calibrature». Deve accumularsi fin oltre una certa soglia prima che cambi qualcosa: la tradizione, in tutte le comunità, è una potente forma di

«resistenza» sociale, che conserva la stabilità sinché alla fine non si ha un cedimento.

Ormai il fenomeno ci è noto: in condizioni del genere, gli elementi del sistema tendono a interagire in maniera da produrre uno stato critico, sicché quando all'improvviso la tensione viene liberata in un punto, si può registrare una reazione a catena di vasta portata. È forse difficile dimostrare che le cose stanno davvero così nei sistemi sociali, ma se vi fosse davvero, nella società, una criticità autorganizzata, sarebbe logico aspettarsi che scoppiassero qui e là grandi guerre e tumultuose rivoluzioni improvvise e nemmeno troppo infrequenti.

Una piccola ricerca statistica lascia pensare che il mondo sia davvero organizzato in questo modo.

Un macabro calcolo

Meditando nel suo «sottosuolo» sulla storia umana, Fëdor Dostoevskij trasse una lineare conclusione:

> si combatte e si combatte, si combatte adesso, si combatteva prima e si combatterà dopo ... In una parola, tutto si può dire della storia universale, tutto quel che può venire in mente alla più sfrenata immaginazione. Una sola cosa non si può dire: che sia ragionevole.[9]

In mezzo a tutte queste battaglie spiccano guerre di inaudita violenza che, come i terremoti catastrofici o le estinzioni di massa, sembrano dovute a cause speciali. Ma le grandi guerre furono realmente preparate e provocate da condizioni peculiari e insolite che persone esperte e intuitive avrebbero potuto riconoscere?

In campo scientifico, le citazioni di relazioni e articoli mostrano l'evolversi delle idee e rendono possibile se non altro quantificare in maniera sommaria il processo. Più difficile è quantificare l'evolversi della generale storia umana. Negli anni Venti, però, il fisico britannico Lewis Richardson studiò 82 guerre scoppiate tra il 1820 e il 1929. Fra tutti i possibili metodi per valutare le dimensioni di un conflitto, scelse il più ovvio e macabro: il conteggio del numero dei morti. Seguendo

un procedimento analogo a quello di Gutenberg e Richter, calcolò quante guerre provocassero tra le 5000 e le 10.000 vittime, quante tra le 10.000 e le 15.000 e così via; poi elaborò un grafico. La curva, che mostrava la frequenza delle guerre di varia entità, rivelò l'esistenza di una semplice legge matematica: al raddoppiare del numero dei morti, il conflitto diventava quattro volte più raro (*figura* 23). È una legge perfettamente equivalente a quella di Gutenberg-Richter e possiamo trarne conclusioni analoghe: le guerre non hanno una dimensione tipica e non vi è motivo di operare una netta distinzione tra schermaglie e terribili conflagrazioni. La curva liscia regolare del grafico lascia capire che le cause iniziali di tutti i conflitti sono probabilmente le stesse.

Oggi la terra è assai più popolata di quanto non fosse molti

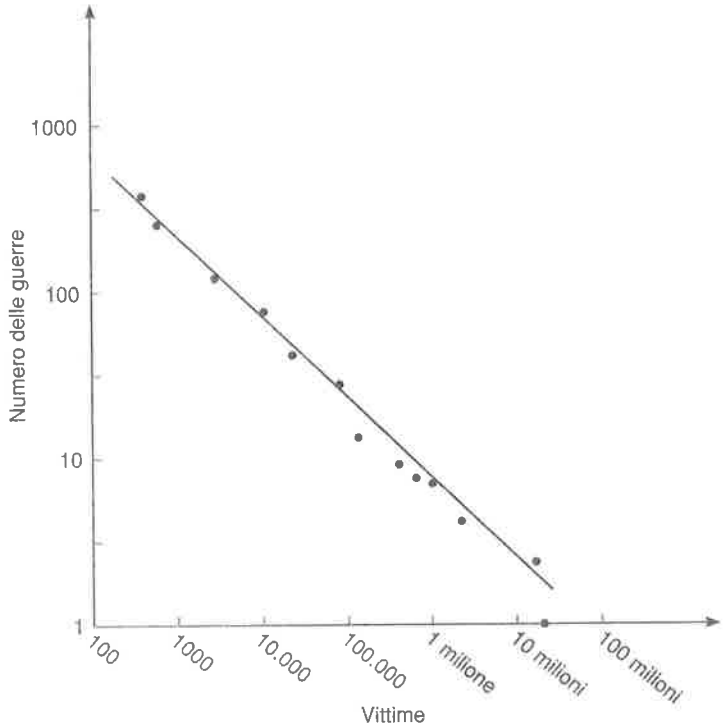


Figura 23. Distribuzione delle guerre in base al numero delle vittime.

secoli o anche solo cent'anni fa, sicché si potrebbe sollevare un'obiezione all'analisi di Richardson: la legge della potenza non deriverà solo dal fatto che in tempi recenti le guerre hanno coinvolto un più elevato numero di persone e quindi prodotto un maggior numero di morti? L'obiezione è legittima, ma altri ricercatori hanno trovato una regolarità analoga anche dopo avere apportato correzioni che tenevano conto dell'incremento demografico. Negli anni Ottanta, per esempio, Jack Levy, dell'università del Kentucky, analizzò diversi conflitti storici, dalla guerra condotta dalla Lega di Venezia contro Carlo VIII nel 1495 alla guerra del Vietnam terminata nel 1975. Modificando la «ricetta» di Richardson, partì dall'assunto che le dimensioni di ciascun evento fossero date dal numero di vittime diviso per la popolazione mondiale dell'epoca: in altre parole, calcolò le dimensioni di ogni conflitto come percentuale della popolazione rimasta uccisa. Nonostante questo, individuò di nuovo una legge della potenza,[10] anche se stavolta le cifre erano leggermente diverse: al raddoppiare delle dimensioni, la guerra diventava 2,62 volte meno frequente.

Superfluo dire che ogni conflitto è scatenato da un qualche contrasto; ma la legge della potenza indica che, per citare di nuovo il sismologo Christopher Scholz, esso all'inizio «non sa quanto diventerà grande», come non lo sanno gli esseri umani. Per qualche motivo il disaccordo, la competizione, la diffidenza e l'odio diventano così forti da superare una soglia e i due gruppi si preparano alla battaglia. Le tradizionali strutture preposte ai negoziati diplomatici danno forfait e i contendenti ricorrono alla forza bruta. Quanto profondo e insanabile diventerà il contrasto dipende anche dalle regioni vicine: se sono anch'esse sul punto di rompere i rapporti, possono infatti diffondere l'ostilità tra altre comunità, altre nazioni, altri esseri umani. Di per sé non è una novità, naturalmente: quando sorge un conflitto, tutti gli esperti di politica internazionale temono che possa, come si suol dire, destabilizzare le regioni vicine, e le attività dell'Onu, della Nato e di analoghe organizzazioni mirano proprio a prevenire simili processi di destabilizzazione.

La novità sta nella legge della potenza, da cui pare lecito ar-

guire che la struttura politico-sociale del mondo si trovi sempre sull'orlo dell'instabilità e sia organizzata in maniera tale che le guerre non presentino una diffusione tipica e sia quindi impossibile prevedere il loro grado di espansione e le loro dimensioni finali. La mancanza di una scala tipica impedisce di dedurre da chiari indizi quanto grandi diventeranno, ma la struttura delle correlazioni che permettono agli esseri umani di organizzarsi pacificamente in nazioni e comunità lascia pensare che le ostilità, una volta scoppiate, si diffondano come gli incendi boschivi o come le valanghe nel modello del mucchietto di sabbia.

In effetti il fisico Donald Turcotte, della Cornell University, ha osservato che la legge della potenza individuata da Levy, dove la frequenza è inversamente proporzionale alle dimensioni di un fattore di 2,62, è assai simile a quella dell'incendio boschivo, dove le cifre oscillano tra 2,5 e 2,8. Si è quindi tentati di concludere che il modello dell'incendio descriva gli elementi cruciali della diffusione dei conflitti. Scrive Turcotte:

> La guerra comincia in maniera simile all'incendio di una foresta. Un paese ne invade un altro oppure un importante uomo politico viene assassinato. Il conflitto allora si diffonde alla regione contigua di paesi metastabili. Tali regioni di metastabilità possono essere il Medio Oriente (Iran, Iraq, Siria, Israele, Egitto ecc.) o l'ex Iugoslavia (Serbia, Bosnia, Croazia ecc.). Alcuni incendi sono grandi, altri piccoli, ma il rapporto tra frequenza e dimensioni segue una legge della potenza. In termini di ordine mondiale vi sono piccoli conflitti che possono, o no, degenerare in grandi guerre. È chiaro che le influenze stabilizzanti e destabilizzanti sono assai complesse.[11]

Considerata la straordinaria somiglianza tra l'andamento dei conflitti armati e quello degli incendi boschivi, non c'è da stupirsi se gli storici non concordano ancora sull'origine della prima guerra mondiale. Quelli che, in maniera piuttosto vaga, imputarono la responsabilità alla «fragilità delle relazioni internazionali» forse erano più degli altri sulla pista giusta. Perché forse la causa non si dovette a un preciso meccanismo d'innesco, ma all'organizzazione complessiva delle relazioni sociali, economiche e politiche umane, a una rete di connessioni che consentì alle influenze malefiche di «propagarsi».

Anche se probabilmente non si è reso conto della fondatezza scientifica delle proprie supposizioni, un acuto storico inglese, Norman Davies, ha addirittura ipotizzato che la prima e la seconda guerra mondiale siano state come due terremoti:

> Gli anni compresi tra il 1914 e il 1945 furono per l'Europa un periodo di grandi traversie, seguito alla lunga pace del XIX secolo e precedente l'ancor più lunga pace della «guerra fredda». Si potrebbero paragonare allo slittamento di una placca continentale e alla conseguente stagione di sismi. Comprendono gli iniziali terremoti militari del 1914-18, il crollo di quattro imperi, lo scoppio della rivoluzione comunista in Russia, il formarsi di una dozzina di nuovi stati sovrani, la tregua armata dei decenni interbellici, l'avvento dei regimi fascisti in Italia, Germania e Spagna, e infine la seconda guerra mondiale protrattasi dal 1939 al 1945.[12]

Il potere del «contagio»

Se si passa ad altri avvenimenti esplosivi come le rivoluzioni, è un po' più difficile trovare leggi matematiche che li descrivano. Mentre le rivoluzioni cinese, francese e russa comportarono grande spargimento di sangue, mutamenti sociali altrettanto rilevanti si sono registrati in Sudafrica e nell'ex Unione Sovietica senza che vi fossero morti e feriti. In questo settore, quindi, i dati statistici sulle vittime non ci danno molte informazioni. Inoltre non sempre le rivoluzioni sono politiche: interessano vari campi anche molto diversi tra loro, come l'arte, la musica, le convenzioni sociali, le abitudini di lavoro, la tecnologia ecc. Ma dietro tutte le trasformazioni sociali di rilievo vi è sempre una molla molto semplice: la capacità di un singolo individuo di influenzarne un altro. Come abbiamo visto nel caso dei mercati finanziari, tale capacità può avere effetti profondi.

Non significa negare l'esistenza del libero arbitrio riconoscere che molto spesso la gente compra certi prodotti, adotta certi punti di vista, vota in un certo modo o scende in piazza a protestare soprattutto perché lo fanno amici, vicini, familiari o colleghi. Nel dicembre del 1989 centinaia di migliaia di romeni scesero in piazza per manifestare contro il regime totalitario di Nicolae Ceausescu. È impensabile che tutti, in maniera simultanea e indipendente, abbiano preso una simile decisione.

Tutti i movimenti di massa all'inizio erano piccoli e si sono espansi proprio perché le azioni di alcuni «contagiano» altri, diffondendo l'ideologia come un virus. Nei mercati finanziari i movimenti di massa producono notevoli variazioni nei prezzi delle azioni o delle obbligazioni; in politica instaurano o abbattono governi, provocano rivoluzioni o conducono le nazioni alla guerra.

Si tratta di una realtà evidente, di cui gli storici parlano da secoli. Come non è una novità che i conflitti scoppiati in un paese possano estendersi a un altro, così non è una novità per gli storici che grandi movimenti sociali nascano non tanto dalla mente di singoli individui quanto dall'interazione di molti individui che si influenzano a vicenda. Osserva Edward Hallett Carr:

> Certo, i fatti storici riguardano sempre gli individui, non già azioni individuali svolgentisi nel vuoto, e non hanno nulla a che fare con le motivazioni, reali o fantastiche, che secondo gli individui sono state alla base delle loro azioni. I fatti storici riguardano i rapporti che legano gli uni agli altri gli individui viventi in società, e le forze sociali che, dalle varie azioni individuali, sviluppano effetti spesso diversi, e non di rado opposti, dai risultati che gli individui si proponevano di raggiungere.[13]

Secondo Carr, la dinamica collettiva è fondamentale nella storia, ma all'epoca in cui scriveva egli non aveva modo di sapere che, almeno in teoria, tale dinamica avrebbe potuto originarsi dallo stato critico e quindi essere profondamente refrattaria a ogni disciplina.

Se li si vede in questa nuova ottica, è assai più facile capire come decollino i movimenti di massa. È chiaro che, per comprendere qualsivoglia rivoluzione, gli storici devono studiare tutte le condizioni sociali da cui è determinata. Per capire che cosa induca una persona a prendere le armi o a scendere in sciopero o a decidere di non avere figli dovrebbero cercare di entrare nella sua testa e valutare tutte le pressioni e le influenze sociali a cui è sottoposta e a cui reagisce. Solo così potrebbero sperare di chiarire che cosa abbia determinato una rivoluzione; le azioni di molti individui, infatti, sono in genere il frutto delle condizioni in cui essi si trovano a vivere. Gli storici, però, dovrebbero studiare meglio il modo in cui le varie in-

fluenze si diffondono in una popolazione. Per comprendere perché i movimenti di massa non siano rari e la storia sia così multiforme e interessante, occorre conoscere bene il carattere dello stato critico.

Negli anni Venti Niels Bohr si lasciò in qualche modo trascinare dal principio di indeterminazione della meccanica quantistica, secondo il quale l'azione dell'osservatore influisce sulla posizione della particella osservata: arrivò a scrivere relazioni in cui ipotizzava che convenisse estendere il principio alle scienze sociali e alla psicologia, altri campi nei quali l'osservatore influiva sul comportamento dell'osservato. Prima di lui altri pensatori avevano cercato di travasare concetti della fisica nel settore umanistico usando come puntello un'errata interpretazione della teoria della relatività, di cui non avevano capito niente. Einstein riteneva che quei tentativi avessero qualcosa di patologico:

> Credo che l'attuale mania di applicare gli assiomi della scienza fisica alla vita umana sia non solo errata, ma in qualche modo riprovevole.[14]

Tuttavia sia la teoria dei quanti sia la teoria della relatività si basano su equazioni indipendenti dalla storia, della quale non si occupano in alcun modo. Nel modello del mucchietto di sabbia e negli altri che abbiamo preso in considerazione, invece, la storia ha un ruolo determinante. E se il carattere dello stato critico dice qualcosa di importante in merito al modo in cui le influenze si diffondono e producono ordine, disordine o cambiamento in un insieme di elementi interagenti, è lecito supporre che risulti prezioso ai sociologi e agli storici. Se non ci lasciamo troppo trasportare e non cerchiamo di correre alle conclusioni, potremo trovare nella criticità autorganizzata indizi utili a capire la dinamica della storia umana.

XIV

L'importanza della storia

È sempre un errore per lo storico cercare di prevedere il futuro. Diversamente dalla scienza, la vita è troppo imprevedibile.

Richard Evans[1]

Non esistono domande stupide: solo chi ha smesso di fare domande è veramente stupido.

Charles Proteus Steinmetz[2]

Secondo Thomas Carlyle, il celebre storico scozzese, «la storia era la biografia dei grandi uomini». Per chi la pensa come lui, Adolf Hitler provocò la seconda guerra mondiale, Michail Gorbaciov pose abilmente fine alla guerra fredda e il Mahatma Gandhi permise all'India di conquistare l'indipendenza. Tale visione idealistica considera la storia opera dei grandi: le persone eccezionali sono ritenute al di fuori del tempo, capaci di imporre la propria volontà «grazie alla loro grandezza».[3]

Benché superata, è un'ottica che ha il suo fascino, soprattutto perché semplifica parecchio le cose. Se imputiamo alla perfidia di Hitler la responsabilità della seconda guerra mondiale, ci pare chiaro perché la guerra scoppiò e ci convinciamo di poter evitare analoghe catastrofi in futuro. Se qualcuno avesse strangolato Hitler nella culla, pensiamo, non sarebbe scoppiato alcun conflitto e non sarebbero morti molti milioni di individui. La storia, vista così, diventa lineare: allo storico basta studiare le azioni di pochi grandi attori, ignorando tranquillamente tutti gli altri.

Oggi la maggior parte degli studiosi non aderisce a tale

concezione e la giudica solo una grottesca parodia del reale funzionamento delle vicende umane. «Nulla provoca tanti errori e deformazioni nella concezione della storia, come l'interesse suscitato dagli individui» scrisse nel 1863 Lord Acton.[4] E anche Carr scartò sdegnosamente l'idea dei grandi uomini come artefici di tutto, definendola «puerile» e tipica degli «stadi primitivi del pensiero storico»:

> È più facile definire il comunismo «creatura del cervello di Karl Marx» ... che analizzarne le origini e le caratteristiche, come è più facile attribuire la rivoluzione bolscevica alla stupidità di Nicola II o all'oro tedesco che studiarne le cause sociali di fondo, o vedere nelle due guerre mondiali di questo secolo il frutto della malvagità individuale di Guglielmo II e di Hitler anziché l'effetto di una profonda incrinatura nel sistema di rapporti internazionali.[5]

Secondo Carr, i fattori realmente importanti nello svolgersi degli eventi sono i movimenti sociali, che magari vengono iniziati dai singoli individui, ma acquisiscono rilevanza solo perché coinvolgono un gran numero di persone. «La storia» concluse «è in gran parte una questione di numero.»[6]

Certo, i grandi uomini e le grandi donne esistono e hanno avuto un'influenza decisiva sul corso degli eventi umani; tutti i movimenti di massa hanno in effetti i loro capi. Ma gli storici che hanno una visione più collettiva della realtà politico-sociale ritengono sbagliato credere che i capi facciano la storia. Lungi dal vivere o pensare nel vuoto, ogni individuo si lascia profondamente influenzare dagli altri, sicché nessuno è un attore così autonomo e padrone di sé come appare. Scrisse Alexis de Tocqueville, il noto storico francese:

> Tra tutti i popoli civili, le scienze politiche generano o, perlomeno, forgiano delle idee generali; e da queste traggono origine sia i problemi che i politici sono costretti ad affrontare, sia le leggi che essi credono di creare. Le scienze politiche rappresentano in certo modo il clima intellettuale che respirano governanti e governati di una società, un clima da cui gli uni e gli altri fanno inconsapevolmente derivare i principi delle loro azioni.[7]

Dunque, benché si trovino al centro di avvenimenti epocali, i grandi uomini e le grandi donne non sono gli artefici della storia. Il ruolo è più importante della persona che lo svolge,

perché è il punto in cui imponenti forze sociali entrano in collisione; ed è svolgendo quel ruolo così cruciale che certi uomini e certe donne diventano grandi.

Prendiamo per esempio Hitler. Se fosse stato strozzato nella culla o fosse comunque morto prima di salire al potere, sarebbe scoppiata la guerra? Lo storico sul genere di Thomas Carlyle direbbe di no. Lo storico convinto della preminenza delle influenze collettive la considererebbe invece una questione più complessa e forse si dichiarerebbe d'accordo con il già citato Richard Evans, secondo il quale la realtà politica e sociale nella Germania degli anni Trenta era tale che se anche Hitler e i nazisti non fossero andati al potere la guerra sarebbe scoppiata lo stesso:

> Le probabilità che la Repubblica di Weimar sopravvivesse divennero minime dopo la recessione del 1929, e una dittatura di destra instaurata per esempio da un politico come Franz von Papen ... o la restaurazione della monarchia Hohenzollern ... avrebbero quasi sicuramente condotto a una sequenza di eventi simile a quella verificatasi davvero: riarmo, revisione del Trattato di Versailles, *Anschluss* dell'Austria e un ritorno estremamente energico e determinato a quelle mire di conquista che i tedeschi avevano mostrato con tanta evidenza durante il conflitto 1914-18.[8]

È sciocco pensare che la fisica matematica possa dare una risposta definitiva al dilemma se siano o no i «grandi uomini» a decidere il corso delle vicende umane. La storia è infinitamente più complessa di un mucchietto di sabbia; tuttavia riflettere sul mucchietto e le sue valanghe può aiutarci a riconoscere gli errori che è fin troppo facile commettere quando si cerca di individuare e dipanare i fili dell'intreccio storico.

I grandi granelli

Supponiamo che, dopo una lunga e onorata carriera, lo storico del mucchietto già incontrato nel XII capitolo decida di scrivere una fondamentale *Storia del mondo di sabbia*. In questo colpo d'ala finale potrebbe ispirarsi al tedesco Leopold von Ranke, che nel 1878, a ottantatré anni, cominciò a scrivere un'imponente *Storia universale* di cui portò a termine diciassette volumi prima di morire, nel 1886. Per imbarcarsi in

un'impresa così impegnativa, lo storico della sabbia dovrebbe considerare l'origine e gli effetti di ogni singola valanga verificatasi. Data l'immensità del compito, forse gli converrebbe concentrarsi pragmaticamente su quelle più grandi e lasciare le più piccole ad altri storici dagli orizzonti più limitati. L'idea sarebbe ragionevole, perché le valanghe più grandi sono senza dubbio quelle che hanno conseguenze più rilevanti: interessano infatti milioni di granelli di sabbia, mentre le altre, la stragrande maggioranza, ne interessano solo pochi, e i numeri hanno importanza nel mucchio. Alla luce di questa considerazione, è chiaro che conviene scrivere la storia nell'ottica dei movimenti «sociali»; resta però da chiarire in che modo lo storico della sabbia debba spiegare la dinamica degli spostamenti di notevole entità.

Egli proverà la forte tentazione di ipotizzare che certi particolari granelli abbiano avuto un'importanza fondamentale. Non a torto, penserà, i suoi colleghi hanno osservato che nel 1492 Granulo Colombo, un granello con un coraggio da leone, produsse una gigantesca valanga nel corso della quale i granelli passarono da oriente a occidente, cambiando così l'intero volto del mondo e della storia. Quegli stessi colleghi imputeranno magari a un altro personaggio la colpa di avere provocato la terribile catastrofe che fece precipitare metà granelli d'oriente dalla collina. Per ogni evento di rilievo, attribuiranno a un granello speciale la responsabilità della valanga e ad alcuni altri quella di averla lasciata rotolare nelle fasi cruciali; e assegneranno a quei granelli il ruolo di veri agenti della storia.

Benché tentato di adottare la metodologia dei colleghi, il nostro storico (sottile osservatore del carattere individuale) avrà notato che nel mondo di sabbia ciascun granello è identico all'altro, per cui non è possibile che vi sia un Grande Granello; così, sebbene sotto il profilo psicologico sia molto attratto dall'idea che gli eventi speciali siano causati da granelli speciali, la rifiuta. Rendendosi conto che il mucchio è costantemente sull'orlo di un mutamento radicale, alla fine capisce che vi sono sempre aree in cui la caduta di un singolo granello può provocare un grave sconvolgimento e che quel granello

ha un'unica caratteristica speciale: quella di cadere nel posto giusto al momento giusto. In un mondo critico, è inevitabile che emergano ruoli critici e che a svolgerli siano alcuni granelli critici per motivi del tutto casuali.

Si può dire lo stesso per la storia umana? È innegabile che alcuni individui siano, per personalità e intelligenza, più influenti di altri; tuttavia vi è, almeno in teoria, la possibilità che il nostro mondo si trovi in uno stato molto affine a quello critico. Ammettiamo dunque che abbia davvero un'organizzazione critica: in tal caso, se anche tutti gli esseri umani avessero capacità identiche, alcuni di loro si troverebbero in situazioni tali da provocare, con atti del tutto ordinari, conseguenze straordinarie. Forse non se ne renderebbero nemmeno conto, perché solo con l'evolversi della storia le loro azioni apparirebbero rilevanti a livello globale. Potrebbero essere definiti grandi uomini o grandi donne in quanto iniziatori di vasti e importantissimi movimenti sociali e molti di loro sarebbero forse davvero delle persone eccezionali, ma non alla loro grandezza andrebbe imputata la grandezza degli eventi provocati.

Come si prova la tentazione irresistibile di attribuire l'origine dei terremoti catastrofici o delle estinzioni di massa a eventi speciali, così si prova la tentazione irresistibile di attribuire l'origine degli avvenimenti più rilevanti della storia a personaggi speciali. Ma il nostro storico criticherebbe aspramente la teoria del Grande Granello, raccomanderebbe ai colleghi del mondo umano di fare altrettanto e forse si dichiarerebbe d'accordo con Georg Wilhelm Friedrich Hegel là dove disse:

> Chi esprime o dice ciò che vuole il suo tempo e lo compie è il grande uomo di quel tempo ... Egli fa ciò che sono l'interiorità e l'essenza del tempo, e le realizza.[9]

Secondo tale ottica, dunque, la grandezza di un evento non è ascrivibile alla grandezza di qualsivoglia individuo. Semmai a rendere un individuo «grande» e importante è la capacità di esprimere istanze latenti – la volontà di un'epoca – e di permettere a forze incomparabilmente superiori a lui d'avere il loro effetto.

In ambito scientifico, Albert Einstein fu un genio di prim'ordine e grazie alla sua straordinaria intelligenza capì le implicazioni delle equazioni di Maxwell prima dei suoi contemporanei. Tuttavia la teoria della relatività fu rivoluzionaria non per via del suo genio, ma perché si rivelò un'enorme valanga che sconvolse il paradigma dell'epoca. Se anche gli scienziati fossero tutti cloni geneticamente identici, alcuni di loro otterrebbero ugualmente risultati rivoluzionari. Per dirla con il biologo Edward O. Wilson: «Il genio è la somma delle produzioni di molti cui viene posto come etichetta il nome di pochi perché venga ricordato meglio».

Forse anche nella storia umana generale la capacità di alcuni individui di esercitare una forte influenza sugli avvenimenti dipende soprattutto dall'organizzazione dei sistemi sociali. E forse questo è vero non solo per le azioni dei singoli, ma anche per molti strani accidenti storici.

Il naso di Cleopatra

«Scrivere storia è come bere l'acqua di un oceano e pisciare quella di una tazza» disse Gustave Flaubert.[10] Ogni avvenimento storico è così denso di particolari che lo studioso, già molto prima di prendere la penna in mano, deve assumersi l'ingrato compito di scremare, scegliendo una percentuale minima dei fatti. Si può specificare che vestiti portasse Hitler da bambino o quante volte Margaret Thatcher mangiasse pesce e patate fritte prima di diventare primo ministro, ma si tratta di fatti non storici. Solo pochissimi eventi e influenze, tra quelli che compongono l'oceano della storia, forniscono informazioni utili a comprendere la rotta seguita dalle vicende umane.

Ma c'è un problema, perché, come osservò Henri Poincaré, «i fatti non parlano»: non emergono dal mare come balene per dichiarare la propria rilevanza. Per capire quali eventi abbiano importanza e quali no, gli studiosi stabiliscono una gerarchia di valori. Chi è convinto che la politica abbia in genere più influenza dell'economia tenderà a estrarre dall'oceano gli avvenimenti politici e a trascurare gli altri, mentre chi è convinto della prevalenza dell'economia farà il contrario. Carr

pensava che tutti gli storici avessero «qualcosa che frullava loro in testa» e raccomandava al pubblico di stare in guardia:

> Quando leggiamo un libro di storia dobbiamo sempre stare con le orecchie tese per sentire che cosa frulla nella testa dello storico. Se non sentiamo niente, o siamo sordi o lo storico in questione non ha nulla da dirci. In realtà i fatti storici non si possono minimamente paragonare a pesci allineati sul banco del pescivendolo. Piuttosto, li potremmo paragonare a pesci che nuotano in un oceano immenso e talvolta inaccessibile; e la preda dello storico dipende in parte dal caso, ma soprattutto dalla zona dell'oceano in cui egli ha deciso di pescare e dagli arnesi che adopera: va da sé che questi due elementi dipendono a loro volta dal genere di pesci che si vuole acchiappare.[11]

Connesso al problema di selezionare i fatti, che dipende dalle inclinazioni personali, c'è il cosiddetto problema del «naso di Cleopatra». Marco Antonio si innamorò di Cleopatra e, stregato dalla sua bellezza, provocò l'ira di Ottaviano, dalla cui flotta fu poi sconfitto nella battaglia di Azio. Qualunque analisi seria dei motivi di quella battaglia e delle sue conseguenze, tra cui la creazione dell'impero romano, dovrà menzionare la bellezza di Cleopatra. Churchill sottolineò il concetto a proposito di un altro avvenimento, il decesso del re di Grecia causato nel 1920 dal morso di una scimmia domestica. Commentando la successiva catena di eventi che condusse la Grecia e la Turchia alla guerra, osservò: «Duecentocinquantamila persone morirono del morso di quella scimmia». Se dettagli minimi interferiscono in continuazione nella più ampia cornice degli eventi modificandola radicalmente, come ci si può fare un quadro chiaro delle cose? Davanti a questo dilemma diventa doppiamente difficile distinguere, nel coacervo, gli avvenimenti importanti da quelli irrilevanti.

In tutte le epoche gli storici hanno discusso di tali problemi. Carr, per parte sua, l'ha fatto e converrà esaminare al riguardo una sua proposta su cui tuttora si dibatte. Egli sosteneva che c'è una gerarchia naturale degli eventi. Supponiamo che un certo Mr. Robinson esca di casa per andare a comprare le sigarette, attraversi la strada poco prima di una curva priva di visibilità e venga investito e ucciso da un'auto guidata da un ubriaco. Che cosa ha provocato la sua morte? Carr riteneva

che le cause degne di nota fossero quelle che si potevano generalizzare. Certo, se non fosse stato un fumatore Robinson non sarebbe morto, sicché il suo bisogno di sigarette fu una delle cause dell'incidente. Non era però una causa generalizzabile, perché in generale il desiderio di sigarette non induce la gente a farsi investire dalle auto. Invece il guidare in stato di ubriachezza e le curve prive di visibilità, che pure contribuirono al decesso, sono cause generalizzabili, perché fanno spesso sì che la gente sia investita; perciò vanno considerate il motivo principale dell'incidente. Analogamente, i nasi delle regine o i morsi delle scimmie non sono cause generali della guerra tra nazioni, anche se possono essere annoverati tra quelle secondarie. Carr riteneva che la storia dovesse trattare le cause generali, le sole capaci di insegnarci qualcosa.

Così divise le cause degli avvenimenti storici in due categorie: quella delle cause generali che fanno realmente la storia e quella delle cause secondarie o aneddoti. La distinzione è assai ragionevole, ma che risultati dà al banco di prova del mucchietto di sabbia? Supponiamo che un granello cada in un punto di ponente dove il mucchio è già ripido e che ne consegua una piccola valanga. Lo storico della sabbia annoterà la causa generale: ogniqualvolta un granello cade in un punto ripido, scriverà, provoca una valanga. È un'osservazione legittima e sensata: nulla da ridire.

Ma supponiamo che un altro granello cada da qualche altra parte e provochi uno spaventoso cataclisma che distrugge l'intero mucchio. Lo storico potrà ancora indicare come causa la ripidità dell'area dov'è caduto il granello, ma che cos'ha reso, in questo caso, la valanga tanto grande? Per rispondere alla cruciale domanda bisognerebbe analizzare l'intera, complessa catena di eventi che ha portato a una catastrofe di tale entità. Lo storico farebbe quindi fatica a trovare una causa generalizzabile e riuscirebbe solo a descrivere una fitta serie di eventi che non si ripeterebbe mai identica.

Come lo storico che vide le origini della prima guerra mondiale in una «profonda incrinatura nel sistema di rapporti internazionali», lo storico della sabbia potrebbe imputare la responsabilità degli eventi a condizioni particolari del terreno

sabbioso che permisero, tragicamente, a un unico granello di produrre il disastro. E forse avrebbe ragione; ma sbaglierebbe a pensare che le «condizioni particolari» avessero qualcosa di insolito ed eccezionale. Come sappiamo, nel modello del mucchietto tali condizioni sono tipiche ed è sempre possibile che un granello, cadendo nel punto «giusto», provochi una gigantesca valanga.

Se la legge della potenza individuata da Richardson e Levy nella distribuzione delle guerre può fungere da indicazione, potremo ipotizzare l'esistenza di una legge analoga nella storia umana, dato che la politica, a livello sia nazionale sia internazionale, si trova probabilmente in condizioni affini allo stato critico. Sul piano locale è forse facile rinvenire cause generali plausibili, come il «disagio» che secondo Read precede sempre una profonda incrinatura dell'equilibrio tradizionale in qualsiasi società umana. La generalizzazione di Read è analoga a quella dell'analista che, davanti ai mucchietti di sabbia, considera i pendii ripidi la causa degli slittamenti o che, davanti al modello degli incendi, capisce che un albero in fiamme può appiccare il fuoco a un albero vicino. Ma perché certe rivoluzioni o certe guerre non hanno effetti rilevanti, mentre altre si trasformano in cataclismi? Qui le cause generali si fanno più elusive: anche nel caso di eventi importanti come le guerre mondiali, gli storici non possono fare altro che indicare in un naso, in un morso di scimmia o in un autista che ha sbagliato strada le origini del conflitto, e poi seguire la catena di eventi successivi. Forse è per questo che non sono riusciti a mettersi d'accordo sulle vere cause della prima guerra mondiale. L'unica causa rilevabile di un evento del genere è probabilmente il fatto che la società è organizzata nello stato critico e che gli sconvolgimenti sono non solo possibili, ma inevitabili.

Se così è, il problema del naso di Cleopatra diventa assai concreto e il filosofo britannico Michael Oakeshott ha ragione quando dice:

> tutti gli avvenimenti storici sono necessari e non si può creare una precisa gerarchia delle cose necessarie. Nessun avvenimento è esclusivamente negativo; nessun avvenimento è del tutto privo di conseguenze.

> Sostenere che un singolo, indistinto evento (indistinto perché nessun fatto storico è nettamente distinguibile dall'ambiente in cui si produce) è determinante, nel senso che causa e giustifica l'intero corso degli eventi successivi, significa non già fare ... storia in modo abborracciato e discutibile, ma non farla del tutto ... Attribuire l'origine di un'intera successione di avvenimenti a un dato avvenimento antecedente non ha senso, come non ha senso attribuirla a un altro singolo evento ... La rigida causalità risulta ... assurda nell'ambito delle interpretazioni storiche.[12]

In una storia segnata dalla criticità, la contingenza diventa di cruciale importanza. Da un lato si può dire, in senso concreto, che le guerre scoppiano perché gli uomini non riescono a comporre i loro contrasti senza ricorrere alla violenza e forse hanno anche sete di sangue, e dall'altro si può dire, in senso più astratto, che scoppiano perché le idee, gli atteggiamenti e i comportamenti collettivi dell'umanità sono soggetti alle stesse grandi fluttuazioni del magnete che oscilla tra la fase magnetica e la fase non magnetica. Certo, niente di ciò che ho scritto negli ultimi capitoli dimostra tale assunto: mi limito a riportarlo e a sottolinearne la fondatezza.

La dinamica della storia

In ambito storico la domanda classica che ci si pone è come evolvano le vicende umane. Un'ipotesi è che, come pensavano Hegel e Marx, la storia somigli a un albero e segua un processo lineare di crescita verso la maturità e la stabilità: le guerre e altri eventi tumultuosi si fanno sempre meno frequenti a mano a mano che l'umanità si avvicina alla società pacificata della «fine della storia». Un'altra ipotesi è che, come suppose Arnold Toynbee, la storia abbia un andamento ciclico come le maree e che l'ascesa e la caduta delle civiltà si ripetano costantemente. Alcuni economisti sono convinti che vi siano cicli regolari nell'attività economica e alcuni politologi sospettano che cicli altrettanto regolari siano rilevabili nello scoppio delle guerre. Ma la storia potrebbe anche essere del tutto casuale e non presentare la benché minima regolarità. In sintesi, quelle che ho appena nominato sono le più accreditate teorie riguardanti il divenire storico.

L'elenco, però, è incompleto. In linea di principio, chiarire la dinamica dei fenomeni non spetta alla storia, ma alla fisica; e negli anni Ottanta i fisici scoprirono che anche i sistemi più semplici potevano comportarsi in modo assai complesso. Immaginiamo una piattaforma che sale e scende in maniera regolare, come nella «giostra aeroplano» di un luna park. Supponiamo di lasciar cadere dall'alto sulla piattaforma una palla di quelle che rimbalzano molto; se il piantito fosse fermo la palla rimbalzando tornerebbe più o meno all'altezza da cui l'avremmo buttata. Ma capire come si comporterebbe se la piattaforma si muovesse sarebbe praticamente impossibile, perché anche il minimo tremito della mano al momento del lancio sarebbe amplificato, sicché dopo pochi rimbalzi verrebbe completamente alterata la traiettoria, che diverrebbe fortemente instabile. Inoltre il grafico dell'altezza raggiunta dalla palla nei vari rimbalzi risulterebbe estremamente irregolare, come succede quando si ha a che fare con il caos.

È dunque possibile che un fenomeno abbia un andamento apparentemente casuale, che invece casuale non è. Siamo di fronte a un altro «divenire», che però non è quello della storia. La teoria del caos dimostra che cose dall'apparenza assai complessa, come la palla rimbalzante su una piattaforma in movimento, hanno in realtà un funzionamento molto semplice. Se si conosce l'altezza della palla in un momento dato, è un semplice problema aritmetico calcolare che altezza raggiungerà dopo un altro rimbalzo: in qualsiasi momento occorrono pochissime informazioni per descrivere lo stato dell'oggetto. Insomma siamo di fronte a un fenomeno elementare, anche se, in quanto caotico, risulta interessante.

La storia, invece, è complessa perché è fatta di molte persone, molti atteggiamenti, molte idee, molti ricordi. Studiare le azioni di innumerevoli uomini e donne nel corso del tempo significa occuparsi di una collettività; perciò la fisica competente a tale compito è la fisica dei sistemi collettivi. Per sapere che cos'accade in un magnete di ferro in qualsivoglia momento, occorrono moltissime informazioni: quelle concernenti l'orientamento di un numero astronomico di atomi dotati di momento magnetico. Un magnete è un corpo estremamente com-

plesso; ma se i fisici apprendono dalla teoria del caos che un sistema semplice può apparire complesso, dalla criticità autorganizzata apprendono che un sistema complesso può comportarsi in modo straordinariamente semplice. Come abbiamo visto nel VI capitolo, l'organizzazione di una sostanza che si trova nello stato critico tra due fasi non dipende affatto dalla natura dei componenti. Fondamentale in essa è l'universalità, che consente di capire come migliaia di sistemi collettivi all'apparenza assai diversi tra loro siano tutti riconducibili a semplici modelli matematici dotati della stessa logica di base.

Perché in un magnete si crei lo stato critico in bilico tra due fasi occorre un'accurata regolazione e molto lavoro di laboratorio. Ma una delle scoperte fondamentali della fisica moderna è che nei sistemi non in equilibrio lo stato critico spesso si crea da solo. Benché i fisici stiano ancora cercando di capire quali siano le condizioni dell'autorganizzazione, le lacune tuttora esistenti nella conoscenza non impediscono a scienziati di altre discipline di sfruttare la scoperta; e non dovrebbero impedirlo nemmeno agli storici.

Come il caos, lo stato critico colma il divario che vi è, a livello teorico, tra regolarità e casualità. Di fatto, la dinamica che genera attraverso il formarsi di fazioni e le forti fluttuazioni non è casuale, ma non è neppure prevedibile. È una dinamica universale e comprensibile che sfugge però alla previsione, si rivela solo nelle statistiche e sembra indurre la mente umana a errori di giudizio. Non pare corrispondere a una norma e a una legge il fatto che ogni tanto lunghi periodi di calma siano improvvisamente interrotti da un cataclisma; invece tale andamento è del tutto naturale. Non solo, ma, nei sistemi complessi, è ubiquo.

XV
Poscritto metascientifico

> Sarò breve, ma non quanto Salvador Dalí, che pronunciò il discorso in assoluto più breve della storia quando disse: «Sarò così breve che ho già finito», e tornò a sedersi.
>
> *E.O. Wilson*[1]

Si studia la storia perché la si trova affascinante. «C'è, nella natura degli avvenimenti, qualcosa che li spinge in una direzione che nessun uomo avrebbe mai voluto fosse presa» ha osservato lo storico Herbert Butterfield. Sì, la storia è affascinante, ma perché? Come mai non ci annoia a morte?

Uno dei motivi di interesse è dato senza dubbio dal fatto che il futuro rappresenta una novità. La storia umana somiglia in certo modo all'evoluzione biologica: gli elementi del presente si organizzano in modi nuovi per produrre in futuro cose totalmente inedite. Vi sono chiaramente delle tendenze nella storia, e una delle più evidenti è l'aumento progressivo della conoscenza scientifica e della complessità tecnica. Nuove metodologie, nuovi prodotti, nuovi orizzonti compaiono costantemente davanti ai nostri occhi. Tuttavia, come abbiamo visto, la storia dell'evoluzione biologica sulla terra è interessante non solo perché, con il diversificarsi delle specie, ha visto emergere nuove creature, ma anche perché è soggetta alla dinamica dello stato critico, la quale si esprime attraverso le estinzioni di massa e le enormi fluttuazioni nella popolazione delle varie specie e dei vari ecosistemi.

Se lo stesso discorso valesse per l'evoluzione della cultura umana, o meglio della rete di culture interconnesse del pianeta,

forse si capirebbe perché la storia non annoia. Per chiarire il problema prendiamo di nuovo l'esempio del magnete. Immaginiamo di vivere in un mondo magnetico in cui la temperatura sia mantenuta al di sotto del punto critico. Tutti gli atomi dotati di momento magnetico avrebbero lo stesso orientamento e in pratica non lo cambierebbero mai. Noi e i nostri simili faremmo la stessa identica cosa e la vita sarebbe un lungo, monotono nulla. Il nostro mondo avrebbe leggi immutabili, una pace eterna, una totale assenza di novità: insomma la storia sarebbe uguale per un tempo immemorabile e riuscirebbe infinitamente noiosa. O meglio, non vi sarebbe affatto storia, perché un'ininterrotta uniformità non si può definire storia, ma mancanza di storia.

Supponiamo adesso che la temperatura superasse di molto il punto critico. Tutti i micromagneti punterebbero ora qui ora là del tutto a caso, e l'orientamento dell'uno non avrebbe la benché minima correlazione con l'orientamento dell'altro. In questo mondo impazzito non potremmo assolutamente contare sui nostri amici, non vi sarebbe un solo brandello di continuità o d'ordine e il passato sarebbe un assurdo susseguirsi di cambiamenti completamente casuali. Sarebbe ancora una volta un mondo noioso, in quanto avrebbe come unica caratteristica la casualità.

Quanto più affascinanti sarebbero le cose se la temperatura fosse vicina al punto critico. D'un tratto ciascun micromagnete potrebbe avere sui suoi vicini un'influenza notevole, ma non così grande da indurli tutti ad allinearsi. La società brulicherebbe di gruppi di varie dimensioni e le alleanze subirebbero costanti modifiche né del tutto ordinate né del tutto casuali. Ogni tanto uno o più micromagneti darebbero inizio a movimenti di massa che, inaspettatamente, si diffonderebbero per l'intero mondo. A quel punto la storia sembrerebbe finita, ma dopo un periodo di calma di durata imprevedibile comincerebbe un movimento di massa di segno contrario. Nessun movimento sarebbe una semplice copia di quello precedente: ogni trasformazione infatti, per vari aspetti specifici, sarebbe diversa dalle altre.

Inoltre la nostra attività potrebbe avere un sensibile effetto

sugli eventi, così come le azioni degli altri potrebbero avere un'influenza profonda, anche se non proprio inevitabile, sulle nostre. Analizzando la storia passata vi riconosceremmo una dinamica singolare, nella quale regolarità e casualità sarebbero mischiate in maniera insieme sconcertante e affascinante. Scopriremmo infatti che quando tutto s'acquieta fino ad apparire prevedibile, un'altra grande fluttuazione provoca lo scompiglio generale.

Ebbene, credo sia ormai chiaro perché il mondo umano è così interessante. Abbiamo visto che, a molti livelli, è realmente soggetto alle stesse fluttuazioni del mucchietto di sabbia o del magnete nel punto critico e, come quei due sistemi, è caratterizzato da un'accresciuta capacità di diffusione delle influenze. Se la struttura sociale e politica del mondo è davvero organizzata in tal modo, dovremo imparare a considerare naturale l'imprevisto. Oggi viviamo in un'epoca relativamente pacifica. Può darsi che la relativa calma duri un altro secolo, come può darsi che entro cinque anni scoppi un'altra guerra mondiale; chi può dirlo? Il nostro paese potrebbe sopravvivere ancora cinquecento anni o sgretolarsi fra trenta. Se il mondo è critico, si potranno analizzare le cause locali e si potrà cercare di capire in che modo le forze politiche e sociali determinino qui e là cambiamenti storici; ma se gli esiti finali di un evento dipendono dalla maniera in cui gli elementi in gioco si collegano per produrre dita di instabilità che percorrono il mondo intero, diventa praticamente impossibile prevedere il futuro. Insomma non si può presupporre che le tendenze persistano e l'unica cosa che si può prevedere è che il futuro continui a sfuggire alla nostra comprensione. Proprio per questo, forse, la storia è interessante: non è né statica né casualmente mutevole, ma si trova in equilibrio precario tra l'uno e l'altro polo, sicché, come il mucchio di sabbia, è sempre sull'orlo di sconvolgimenti drammatici.

Stephen Jay Gould, il noto paleontologo e biologo evolutivo americano, ha giustamente osservato:

> Noi siamo particolarmente colpiti da eventi che non erano inevitabili, ma che si verificarono per ragioni identificabili connesse a un concorso di circostanze. Di contro, entrambi gli estremi della dicotomia

usuale – l'inevitabile e il veramente casuale – hanno di solito un impatto minore sulle nostre emozioni perché non possono essere controllati da agenti e oggetti della storia, e perciò sono o incanalati o urtati, senza che vi sia molta speranza di poterli respingere. Ma, nell'ottica della contingenza, veniamo coinvolti e condividiamo lo sforzo del trionfo o il dolore della tragedia. Quando ci rendiamo conto che l'esito finale non era necessariamente determinato, che ogni mutamento in ogni passo lungo la strada avrebbe potuto indirizzare gli eventi in una diversa direzione, ci rendiamo conto del potere causale dei singoli eventi. Possiamo discutere, lamentarci o esultare su ogni particolare, poiché ciascuno di essi può avere il potere di determinare una trasformazione. La contingenza è l'affermazione del controllo di eventi immediati sul destino, il regno perduto per colpa di un chiodo di ferro di cavallo.[2]

Nel nostro mondo, nemmeno il più piccolo evento sfugge al sistema e anche un'inezia può avere un'influenza tale da cambiare l'insieme. Non tutti i sistemi seguono una simile logica. Il nostro pianeta avrebbe potuto essere strutturato in un altro modo.

La fisica della storia

Alcuni storici hanno cominciato a capire che la fisica può davvero fornire un nuovo vocabolario concettuale adatto ai loro studi. Come ha osservato di recente Niall Ferguson, dell'università di Oxford:

molti filosofi della storia che nel Novecento dibatterono sul problema se la storia fosse una «scienza» non si resero conto di avere un'idea antiquata e ottocentesca della scienza. Inoltre, se avessero riservato maggiore attenzione a ciò che facevano i loro colleghi scienziati, avrebbero scoperto con stupore e forse perfino con piacere di essersi posti le domande sbagliate. Perché ciò che contraddistingue molti moderni sviluppi delle scienze naturali è il carattere storico.[3]

Ferguson sostiene che la teoria del caos è, per lo storico, un prezioso strumento concettuale atto a «conciliare i concetti di causalità e contingenza». In effetti la teoria del caos rivela che anche nei processi strettamente deterministici una minima variazione iniziale può produrre un risultato assai diverso; ma, come abbiamo visto, a mancarle è il concetto fondamentale di comportamento collettivo. La storia è il frutto non di pochi,

bensì di infiniti fattori. Per capirne la possibile dinamica, occorre quindi ricorrere alla scienza storica dei sistemi in cui interagiscono molti elementi indipendenti.

È, questo, il campo della fisica statistica del non equilibrio. È evidente che in sistemi del genere non si può sperare di fare previsioni esatte, ma a compensare la carenza di ordine a livello di singoli eventi intervengono leggi statistiche molto regolari e spesso molto semplici, come le leggi della potenza che abbiamo incontrato più volte e che mostrano come a monte di determinati eventi agisca in profondità un processo storico. Non è alla teoria del caos che gli storici dovrebbero rivolgersi per rinvenire utili strumenti di ricerca, ma al principio di universalità, il quale rivela una verità straordinaria: in una vasta serie di condizioni, i sistemi composti da ogni sorta di oggetti interagenti hanno caratteristiche universali di comportamento.

Nel mondo antico, la gente attribuiva in genere la responsabilità dei grandi eventi alla volontà degli dei. Come ha scritto lo storico Herbert Butterfield:

> Quando le cause sembravano inadeguate agli effetti, quando la spiegazione di prammatica appariva poco convincente, quando il caso o una congettura strana conducevano a un evento in contrasto con le aspettative, quando i fattori di norma esclusi o alieni dalla logica comune ... davano alla narrazione un'angolatura insolita, si credeva regolarmente che fosse intervenuto [Dio]. Il ricorso all'intervento divino per spiegare l'inatteso è assai significativo. L'importanza della contingenza nella storia, l'incapacità, ai primi stadi della civiltà, di comprendere tutti i nessi tra gli avvenimenti, l'esistenza delle catastrofi, il fatto che grandi conseguenze potessero essere prodotte da piccole cause, la paura di un mondo il cui funzionamento era ignoto, la sensazione che la storia fosse qualcosa che accadeva all'uomo anziché qualcosa che l'uomo forgiava, il senso di dipendenza tipico di chi non sa né capire né padroneggiare i fenomeni naturali, la misteriosità degli accadimenti ... furono tutti fattori che indussero l'umanità a credere che nella vita molto dipendesse dagli dei.[4]

Le grandi guerre e le grandi rivoluzioni ci sconcertano tuttora, ma adesso le affrontiamo senza il conforto metafisico che dava l'antica credenza negli dei. Sappiamo che a fare la storia sono individui che agiscono in qualità di individui, che ciascuno serba in sé il potenziale per la guerra e per la pace e che

in qualche modo, dal misterioso oceano delle attività individuali, emergono fin troppo spesso grandi ondate di maremoto votate a cancellarci. Non ci farà certo sentire più tranquilli e felici capire che simili ondate sono forse inevitabili; ma se non altro ci permetterà di comprendere che il tumultuoso percorso dell'umanità è il prodotto non già di una perversa follia, bensì della semplice matematica e della normale natura dell'umanità stessa.

Questa è un'era straordinaria per la fisica. Come osservò nel 1997 il fisico James Langer, dell'università della California di Santa Barbara:

> Per la prima volta nella storia, abbiamo gli strumenti, l'apparato sperimentale e le capacità computazionali e concettuali per rispondere a domande che gli esseri umani più riflessivi si erano sempre posti ... Mai come ora mi sono sentito così ottimista in merito alla vitalità intellettuale dei fisici.[5]

Langer in quell'occasione commentava lo sforzo teorico compiuto per comprendere un processo storico non connesso alle vicende umane: la cristallizzazione che conduce alla forma infinitamente complessa dei fiocchi di neve. I fiocchi di neve si cristallizzano in ghiaccio ad alta quota e il modo in cui crescono è un perfetto esempio di processo in cui la storia ha un ruolo importante. Per caso, mentre concludevo la prima stesura di questo capitolo finale, ero seduto davanti a una finestra affacciata su una montagna delle Alpi francesi e una bufera alpina copriva i pendii di un numero incredibile di fiocchi. I fiocchi sono infiniti, ma ancora più impressionante è il fatto che non ve ne siano due identici e che nel contempo tutti condividano caratteristiche universali. Per parecchi secoli la neve ha rappresentato un fitto mistero, ma ora non più; ora la scienza si è finalmente sviluppata abbastanza da capire la strana forma dei fiocchi.

La fisica del non equilibrio è la nuova frontiera dei fisici; e dai vari modelli storici di cui si legge sulle riviste scientifiche, nonché dai notevoli passi avanti che quei modelli hanno consentito di compiere in innumerevoli settori, è facile arguire che Langer avesse ragione ad aver fiducia nella «vitalità intel-

lettuale» degli odierni ricercatori. Ma siamo naturalmente solo alle prime battute. Tutte le ricerche che ho menzionato nel presente saggio costituiscono solo un primo, timido inizio per la scienza «storica», di qualunque campo si occupi: i terremoti, le estinzioni, i fiocchi di neve, la dinamica delle scoperte scientifiche o l'intera storia umana.

In *Guerra e pace,* Tolstoj si chiedeva: «Come mai milioni di uomini compiono delitti collettivi, guerre, uccisioni e così via?».[6] Forse non è azzardato supporre che quanto i fisici stanno imparando nel loro modo peculiare, con il loro *penchant* per la semplificazione e l'astrazione, un giorno permetterà agli storici di dare alla domanda una risposta meno vaga di quella che le diede Tolstoj stesso:

> Noi non sappiamo perché accada una guerra o una rivoluzione; noi sappiamo soltanto che per compiere l'una o l'altra azione gli uomini si assommano in una determinata unione, alla quale tutti prendono parte; e noi diciamo che così è, perché è inconcepibile che sia altrimenti, che si tratta di una legge.[7]

Note

I. *Causa prima*

[1] John Kenneth Galbraith, Lettera a John F. Kennedy, 2 marzo 1962, in *Ambassador's Journal*, Houghton Mifflin, 1969, p. 312.

[2] Paul Valéry, *Variété IV*, in *Oeuvres*, a cura di Jean Hytier, Paris, Gallimard, 1960, vol. I. In italiano è disponibile solo una silloge dei cinque volumi di *Varieté* (a cura di S. Agosti, Milano, Rizzoli, 1971).

[3] A.J.P. Taylor, *Storia della prima guerra mondiale*, trad. it. di P. Pieroni, Firenze, Vallecchi, 1967, p. 11.

[4] Si veda, per esempio, Niall Ferguson, *The Pity of War*, Penguin, 1998.

[5] Clarence Alvord, citato in Peter Novick, *That Noble Dream*, Cambridge University Press, 1988, pp. 131-32.

[6] Niall Ferguson, *The Pity of War*, cit., p. 146.

[7] Francis Fukuyama, *La fine della storia e l'ultimo uomo*, trad. it. di D. Ceni, Milano, Rizzoli, 1996.

[8] H.A.L. Fisher, citato in Richard Evans, *In Defence of History*, Granta Books, 1997, pp. 29-30.

[9] Sito web della città di Kobe, http://www.city.kobe.jp/.

[10] Paul Somerville, *The Kobe earthquake. An urban disaster*, «Eos», 1995, 76, pp. 49-51.

[11] Citato in Rocky Barker, *Yellowstone Fires and Their Legacy*, disponibile *on line* nel sito http://www.idahonews.com/yellowst/yelofire.htm.

[12] «Wall Street Journal», 23 settembre 1987.

[13] «Wall Street Journal», 26 agosto 1987.

[14] «Wall Street Journal», 7 ottobre 1987.

[15] «Wall Street Journal», 19 ottobre 1987.

[16] Robert Prechter jr, *The Wave Principle of Human Social Behaviour*, New Classics Library, 1999, p. 378.

[17] William James, *Principi di psicologia*, trad. it. di G.C. Ferrari, Milano, Società Editrice Libraria, 1905.

[18] Albert Camus, *Il mito di Sisifo*, trad. it. di A. Borelli, Milano, Bompiani, 1964, p. 39.

[19] P. Bak, C. Tang e K. Weisenfeld, *Self-organised criticality. An explanation of 1/f noise*, «Physical Review Letters», 1987, 59, pp. 381-84.

[20] Per Bak, *How Nature Works*, Oxford University Press, 1996.

[21] C'è un fenomeno che la simulazione al computer di Bak, Tang e Weisenfeld non riproduce fedelmente: la valanga nei mucchietti di sabbia *veri*. Ma il problema ha scarso rilievo; anche se sembra paradossale, ormai il loro modello, come

esempio di criticità autorganizzata operante a vari livelli nel nostro pianeta, appare infinitamente più importante del mucchio di sabbia vero. Su questo punto mi soffermerò nel VII capitolo.

[22] Paul Kennedy, *Ascesa e declino delle grandi potenze*, trad. it. di A. Cellino, Milano, Garzanti, 1993.

II. *Misteri sismici*

[1] Paul Valéry, *Analecta*, in *Tel quel, Oeuvres*, cit., vol. II.

[2] Charles Richter, *Acceptance of the Medal of the Seismological Society of America*, «Bulletin of the Seismological Society of America», 1977, 67, pp. 1244-47.

[3] W. Spence, R.B. Hermann, A.C. Johnston e C. Reagor, *Responses to Iben Browning's prediction of a 1990 New Madrid, Missouri, earthquake*, «US Geological Survey Circular», 1083, US Government Printing Office, 1993.

[4] R. Rikitake, *The large-scale earthquake countermeasures act and the earthquake prediction council in Japan*, «Eos Transactions of the American Geophysical Union», 1979, 60, pp. 553-35.

[5] B.T. Brady, *Theory of earthquakes, IV, General implications for earthquake prediction*, «Pure and Applied Geophysics», 1976, 114, pp. 1031-82.

[6] *USC Geology Chairman Forecasts Quake*, «Los Angeles Times», 29 aprile 1995.

[7] J.R. Gribben e S.H. Plagemann, *The Jupiter Effect*, Macmillan, 1974.

[8] Mark Twain, *Vita sul Mississippi*, trad. it. e intr. di M. Guidacci, Roma, Opere nuove, 1962.

[9] R.J. Geller, *Predictable publicity*, «Seismological Research Letters», 1997, 68, pp. 477-80.

[10] Ovviamente, si effettuano in continuazione previsioni molto più generiche. Si sa che in passato molti terremoti hanno colpito regioni come la California e il Giappone e non lo stato di New York o la Gran Bretagna; di conseguenza, si ammette che il rischio di sismi è più alto in certe zone che in altre. Tale consapevolezza è preziosa, perché induce a costruire edifici antisismici nelle aree ad alto rischio, ma naturalmente non permette di prevedere terremoti specifici.

[11] R.J. Geller, *Earthquake prediction. A critical review*, «Geophysical Journal International», 1997, 131, pp. 425-50.

[12] Peter Medawar, *Pluto's Republic*, Oxford University Press, 1984.

[13] Si vedano i commenti di Ian Main quando aprì il dibattito *on line* di «Nature» sull'argomento «È possibile prevedere i terremoti?». Al dibattito, organizzato nella primavera del 1999, parteciparono molti dei maggiori sismologi del mondo. I vari contributi si possono leggere nel sito web http://www.nature.com/.

[14] Alcuni ricercatori sostengono che sono stati individuati segni premonitori abbastanza affidabili, ma i loro ragionamenti suonano assurdi. Nel dibattito *on line* di «Nature», qualcuno affermò che «alcuni terremoti, circa il 10-30 per cento, sono preceduti da prescosse nella settimana precedente il sisma, altri da una preattività della durata di un anno, altri ancora da attività saltuaria distribuita negli anni precedenti e altri, infine, da assenza di attività». In altre parole, una settimana, un anno o vari anni prima del terremoto può esserci come non esserci una certa attività: insomma può accadere di tutto, compreso niente di niente. Piuttosto generica, come indicazione... Saranno anche indizi affidabili, ma certo non sono molto utili.

[15] La magnitudo del terremoto, che indica l'energia totale liberata, è un logaritmo in base dieci. Perciò un sisma di magnitudo 7 è dieci volte più potente di uno di magnitudo 6.

[16] W.H. Bakun e A.G. Lindh, *The Parkfield, California, earthquake prediction experiment*, «Science» 1985, 229, pp. 619-24.

[17] C.F. Shearer, Verbali del National Earthquake Prediction Evaluation Council, 29-30 marzo 1985, *US Geological Survey Open File Report*, pp. 85-507.

[18] *A proposed initiative for capitalizing on the Parkfield, California, earthquake prediction, Commission on Physical Sciences, Mathematics and Resources*, National Research Council, National Academy Press, Washington DC, 1986.

[19] *Small earthquake somewhere, next year - perhaps*, «The Economist», 1° agosto 1987.

[20] Y.Y. Kagan, *Statistical aspects of Parkfield earthquake sequence and Parkfield prediction experiment*, «Tectonophysics», 1997, 270, pp. 207-19.

[21] Richard Evans, *In Defence of History*, cit., p. 59.

[22] A voler essere esatti, la materia del mantello non è propriamente liquida, ma solida. È composta da un insieme di minerali, ma è così incandescente e subisce una tale pressione, che riesce lo stesso a fluire come fosse liquida. Il movimento è lentissimo.

[23] http://www-socal.wr.usgs.gov/index.html.

III. *Fallacia del senso comune*

[1] Friedrich Nietzsche, *Crepuscolo degli idoli*, trad. it. di F. Masini, Milano, Adelphi, 1983, pp. 60-61.

[2] Eric Temple Bell, *Mathematics. Queen and Servant of Science*, McGraw-Hill, 1940.

[3] Eliza Bryan, in *Lorenzo Dow's Journal*, Joshua Martin, 1849, pp. 344-46.

[4] Vi è un'eccezione. I «sismi profondi» non si verificano nella friabile crosta terrestre, ma molto più in profondità: quando un blocco roccioso sottoposto a enorme pressione subisce di colpo un cambiamento di fase, cioè muta all'improvviso la sua struttura a livello molecolare, il volume della roccia cambia all'improvviso, provocando un terremoto.

[5] Francis Fukuyama, *La fine della storia e l'ultimo uomo*, cit., p. 344.

[6] C.H. Scholz, *Whatever happened to earthquake prediction?*, «Geotimes», 1997, 42, pp. 16-19. La relazione originale era: *Preliminary assessment of long-term probabilities for large earthquakes along selected fault segments of the San Andreas fault system in California, US Geological Survey Open File Report*, 1983, pp. 83-163. Nella zona si verificò poi, nel 1989, il terremoto di Loma Prieta; alcuni ricercatori studiarono la faglia in quella località e conclusero che lo slittamento dei due blocchi era pari a quello della maggior parte degli altri segmenti durante il sisma del 1906, sicché la logica della previsione originaria pareva infondata. Il dibattito sull'argomento continua. Si veda Robert Geller, *Earthquake prediction. A critical review*, cit.

[7] P.M. Davis, D.D. Jackson e Y.Y. Kagan, *The longer it's been since the last earthquake, the longer the expected time till the next?*, «Bulletin of the Seismological Society of America», 1989, 79, pp. 1439-56.

[8] Robert Geller, *Earthquake prediction. A critical review*, cit.

[9] L'ampia diffusione della curva a campana è la conseguenza di quello che i matematici chiamano «teorema del limite centrale». L'espressione magniloquente descrive un fatto semplice: ogniqualvolta un numero sufficientemente grande di influenze indipendenti contribuisce al risultato di un determinato evento, quel risultato cadrà su una curva a campana. Se gettiamo un dado cento volte, sommiamo i numeri e ripetiamo l'operazione una seconda e una terza volta, elaborando il grafico dei risultati troveremo sicuramente una curva a campana con media di 350. La distribuzione è normale perché ciascuno dei cento lanci di dado è indipendente dagli altri. Il teorema del limite centrale è uno strumento assai efficace; tuttavia, se la curva a campana descrive un numero elevato di fenomeni, è altrettanto elevato il numero di quelli che non descrive.

[10] Condussero l'esperimento sia con le patate congelate (sbucciate, naturalmente) sia con pezzi di gesso, sapone e altro materiale. I risultati furono, in ciascun caso, quasi identici. Si veda L. Oddershede, P. Dimon e J. Bohr, *Self-organized criticality in fragmenting*, «Physical Review Letters», 1993, 71, pp. 3107-10.

IV. *Accidenti della storia*

[1] Max Gluckman, *Politics, Law and Ritual*, Mentor Books, 1965, p. 60.
[2] John Archibald Wheeler, «American Journal of Physics», 1978, 46, p. 323.
[3] Isaiah Berlin, *Concepts and Categories*, Pimlico, 1999, p. 159.
[4] Benoît Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, 1983.
[5] Il concetto di oggetti geometrici invarianti di scala fu elaborato per la prima volta dal matematico tedesco Karl von Weierstrauss nel 1872.
[6] B.V. Chirikov, *A universal instability of many-dimensional oscillator systems*, «Physics Report», 1979, 52, pp. 265-379.
[7] Per favorire la formazione del cristallo si potrebbe procedere all'«innesco» mettendo un grano di sale già formato nella soluzione o facendo penzolare uno spago nel bicchiere. Ma una volta iniziato, il processo di cristallizzazione continua per conto suo.

V. *L'ubiquità dello stato critico*

[1] John von Neumann, *Collected Works*, Pergamon, 1961, vol. 6, p. 492.
[2] Friedrich Nietzsche, *Crepuscolo degli idoli*, cit., p. 25.
[3] Albert Camus, *Il mito di Sisifo*, cit., p. 39.
[4] Si possono rinvenire dati rappresentativi per il sistema di faglie di San Andreas in R.E. Wallace, *Surface fracture patterns along the San Andreas fault*, in *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System*, «Special Publications of Geological Science», 13, a cura di R. Kovach e A. Nur, pp. 248-50, Stanford University Press, 1973.
[5] R. Burridge e L. Knopoff, «Bulletin of the Seismological Society of America», 1967, 57, p. 341.
[6] P. Bak e C. Tang, *Earthquakes as a self-organized critical phenomenon*, «Journal of Geophysical Research», 1989, B94, p. 15635.
[7] È il caso di ricordare che Bak e Tang non furono gli unici a collegare il modello dei mucchietti di sabbia ai terremoti. Nello stesso periodo diversi altri ricercatori arrivarono, in maniera indipendente, a conclusioni analoghe. Si vedano per esempio: A. Sornette e D. Sornette, *Self-organized critically and earthquarkes*, «Europhysics Letters», 1989, 9, p. 197, e K. Ito e M. Matsuzaki, *Earthquakes as self-organized critical phenomena*, «Journal of Geophysical Research», 1990, 95, p. 6853.
[8] Z. Olami, H.J. Feder e K. Christensen, *Self-organized criticality in a continuous, non-conservative cellular automaton modelling earthquakes*, «Physical Review Letters», 1992, 68, pp. 1244-47.
[9] K. Ito, *Punctuated equilibrium model of evolution is also an SOC model of earthquakes*, «Physical Review E», 1995, 52, 3232-33.
[10] Francis Crick, *La folle caccia*, trad. it. di L. Montixi Comoglio, Milano, Rizzoli, 1990, p. 177.

VI. *De magnete*

[1] Robert Oppenheimer, *The Open Mind*, Simon & Schuster, 1955.
[2] Homer Adkins, «Nature», 1984, 312, p. 212.
[3] In Alan Mackay, *A Dictionary of Scientific Quotations*, Bristol, IOP Publishing, 1991.

[4] La descrizione è incompleta, perché non sempre la viscosità ha potere rallentante. Il brodo ha viscosità, ma se gli si imprime un movimento circolare in una tazza, vortica comunque. Se si conducesse lo stesso esperimento con il brodo superfluido, il liquido rimarrebbe fermo. Qualche anno fa il fisico Richard Packard e i suoi colleghi dell'università della California a Berkeley compirono un bell'esperimento. Misero il superfluido in un semicilindro circolare cavo, una sorta di truogolo in miniatura strutturato ad anello, e posero l'anello su un banco del laboratorio, dove, essendo collegato con la terra, ruotava una volta al giorno. Per restare fermo secondo la sua natura, il superfluido doveva fluire lungo l'anello. Misurando il flusso, l'équipe di Packard poté calcolare la velocità di rotazione della terra fino al millesimo.

[5] Citato in Cyril Domb, *The Critical Point*, Taylor & Francis, 1996, p. 130.

[6] Daniel Dennett, *L'idea pericolosa di Darwin*, trad. it. di S. Frediani, Torino, Bollati Boringhieri, 1997, p. 220.

[7] Adattamento di immagini tratte da J.J. Binney et al., *An Introduction to the Theory of Critical Phenomena*, Oxford University Press, 1992.

[8] L'orientamento degli atomi è pura questione di caso. In un migliaio di simulazioni, i micromagneti si troverebbero 500 volte orientati verso l'alto e 500 verso il basso: non hanno preferenza per l'una o l'altra direzione. In che modo si orientino dipende da dettagli accidentali dello stato iniziale casuale da cui partono. I fisici definiscono il loro orientamento finale «rottura spontanea della simmetria». Se infatti gli atomi dotati di momento magnetico sono del tutto indifferenti all'orientamento verso l'alto o verso il basso, che considerano equivalenti (questa è la simmetria), di fatto in qualsiasi momento specifico si orientano, mostrando quindi una «preferenza» e rompendo la simmetria.

[9] Per semplificare al massimo le cose, ho usato un linguaggio leggermente diverso da quello consueto della fisica. I fisici non parlano di «numero critico», ma di «esponente critico». Il rapporto tra i due è molto semplice. La legge della potenza di Gutenberg-Richter dice che il numero di terremoti che liberano energia E è inversamente proporzionale a E^2. Perciò, al raddoppiare dell'energia liberata, il terremoto diventa quattro volte più raro. In tutto il corso del libro ho illustrato la legge della potenza parlando regolarmente di «quattro volte» anziché di «2^2». Al raddoppiare della dimensione del fenomeno dato, quanto diminuisce la sua frequenza? Di un fattore di quattro? Ecco che allora «quattro» è ciò che intendo con «numero critico». L'esponente critico, invece, è il «due», la potenza alla quale viene elevato E nella legge di Gutenberg-Richter. In poche parole, il mio numero critico è uguale a due elevato alla potenza dell'esponente critico, ossia $2^{(\text{esponente critico})}$. Potrà sembrare una scelta tortuosa, ma non volevo introdurre l'idea di un numero elevato a una potenza che non è un numero intero, come 1,5 o 1,31 o addirittura – 1,6: mi pareva potesse riuscire disorientante per qualche lettore. In ogni caso, non è molto importante che si parli di «esponente critico» o di «numero critico» per definire una legge della potenza: l'importante è che vi sono diverse leggi della potenza, le quali tuttavia condividono lo stesso carattere speciale e autosimilare.

[10] Quasi nient'altro: in fisica esiste sempre l'eccezione. Un altro fattore che conta è la gamma delle interazioni tra particelle. Se le particelle interagiscono su lunghe distanze, ciò può far passare il sistema da una classe di universalità all'altra.

[11] Le prove matematiche risalgono agli anni Settanta, quando Kenneth Wilson, della Cornell University, elaborò la teoria del gruppo di rinormalizzazione, per la quale vinse il premio Nobel. Si può dire che il gruppo di rinormalizzazione *dimostri* il principio di universalità.

[12] Nel 1995, per esempio, alcuni fisici della Eidenössische technische Hochschule di Zurigo costruirono un magnete sottilissimo. Stesero su un piano una

pellicola di ferro dello spessore di un atomo e vi deposero sopra qualche altro atomo di ferro in una configurazione irregolare. In alcuni punti aggiunsero un terzo strato, a caso. Il risultato fu una versione molto rudimentale del magnete bidimensionale di Onsager: lo strato di ferro non era perfettamente bidimensionale e gli atomi dotati di momento magnetico non formavano un reticolo regolare. Vi erano poi altre differenze. Il ferro è un metallo e la teoria quantistica ci dice che i suoi micromagneti non hanno in realtà neppure una precisa localizzazione: si trovano «sparsi» bizzarramente su un'ampia regione. Inoltre, mentre nel modello computerizzato le interazioni tra atomi vicini sono tutte esattamente identiche, nella pellicola di ferro irregolare sono tutte leggermente diverse. Nonostante questo, gli esponenti critici della rozza lastra sottile concordavano *esattamente* con quelli del modello di Onsager. La dimensione dell'oggetto e la dimensione del parametro d'ordine erano le stesse, e ciò bastava. C.H. Bach et al., *Experimental confirmation of universality for a phase transition in two dimensions*, «Nature», 1995, 378, pp. 597-600.

[13] Attenzione: lo stato critico che abbiamo analizzato nel capitolo origina nei sistemi in equilibrio che si trovano tra due diverse fasi. Nel caso dei sistemi in equilibrio, i fisici hanno la «ricetta generale» per calcolare quale sia il comportamento alle varie temperature, e il principio di universalità consegue dalla «ricetta» attraverso i metodi del gruppo di rinormalizzazione di Kenneth Wilson. Nel caso dei sistemi che non sono in equilibrio, nessuno ha ancora scoperto il metodo per calcolare lo stato medio o l'entità delle fluttuazioni intorno alla media. Di conseguenza, non c'è (non ancora) un teorema generale dell'universalità che valga per tutti i sistemi non in equilibrio. Tuttavia i fisici hanno scoperto che molti dei semplici modelli di non equilibrio da loro studiati rientrano effettivamente in classi di universalità. Pare quindi che un qualche tipo di universalità valga anche per i sistemi non in equilibrio.

VII. *La criticità autorganizzata*

[1] Citato in Alan J. Mackay, *A Dictionary of Scientific Quotations*, cit.

[2] Samuel Karlin, 11ª R.A. Fischer Memorial Lecture, Royal Society, 20 aprile 1983.

[3] Hendrik Jensen, *Self-organized Criticality*, Cambridge Lecture Series, in *Physics 10*, Cambridge University Press, 1998, p. 148.

[4] B. Malamud, G. Morein e D. Turcotte, *Forest fires. An example of self-organized critical behaviour*, «Science», 1998, 281, pp. 1840-42.

[5] Stephen Pyne, *America's Fires*, Forest History Society, 1997.

[6] Steve Allison-Bunnell, *The Dance of Life and Death*, una serie di articoli sugli incendi boschivi disponibile nel sito web http://www.discovery.com/.

[7] US Federal Wildland Fire Policy, nel sito web http://www.fs.fed.us/.

[8] D. Lockwood e J. Lockwood, *Evidence of self-organized criticality in insect populations*, «Complexity», 1999, 2, pp. 49-58.

[9] C.J. Rhodes e R.M. Anderson, *Power laws governing epidemics in isolated populations*, «Nature», 1996, 381, pp. 600-02.

[10] R. Garcia-Pelayo e P.D. Morley, *Scaling Law for pulsar glitches*, «Europhysics Letters», 1993, 23, p. 185.

[11] V. Frette et al., *Avalanche dynamics in a pile of rice*, «Nature», 1996, 379, pp. 49-52.

[12] Per Bak, *How Nature Works*, cit., p. 51.

[13] A. Vespignani e S. Zapperi, *How self-organized criticality works. A unified meanfield picture*, «Physical Review E», 1998, 57, pp. 6345-62. Si veda anche Ronald Dickman, Miguel Muñoz, Alessandro Vespignani e Stefano Zapperi, *Paths to Self-Organized Criticality*, Los Alamos e-print (*cond-mat/9910454*).

VIII. *Tempo di estinzioni*

[1] Laurence Sterne, *La vita e le opinioni di Tristram Shandy, gentiluomo*, trad. it. di L. Conetti, Milano, Mondadori, 1992, p. 148.

[2] Daniel Dennett, *L'idea pericolosa di Darwin*, cit., p. 24.

[3] Descrive bene la ricerca di fossili nel Montana orientale Peter Ward in *The End of Evolution*, Weidenfeld & Nicolson, 1995.

[4] Forse non tutti i dinosauri. I paleontologi ora ritengono che alcuni siano sopravvissuti e si siano poi evoluti in uccelli. Dopotutto, quindi, ci sarebbero ancora dinosauri sulla terra...

[5] F.B. Loomis, *Momentum in variation*, «American Naturalist», 1905, 39, pp. 839-43.

[6] F. Nopsca, *Notes on British dinosaurs, part IV, Stegosaurus priscus*, sp. Nov., «Geological Magazine», 1911, 8, pp. 143-53.

[7] M. Benton, *Scientific methodologies in collision. A history of the study of the extinction of the dinosaurs*, «Evolutionary Biology», 1990, 24, pp. 371-400.

[8] A questo proposito ricordo l'acume psicologico (e la lucidità) mostrati da John Maddox, ex direttore di «Nature». Egli aveva scarsa simpatia per gli autori che volevano intitolare il loro articolo *Prove di...* Un titolo, diceva, doveva descrivere i fatti realmente verificati, non quanto si riteneva che quei fatti implicassero. Se gli autori, come spesso accadeva, protestavano, Maddox proponeva di lasciare nel titolo il termine «prove», ma di aggiungervi, per onestà intellettuale, «non conclusive». Credo che nessuno abbia mai accettato la proposta.

[9] S.A. Bowring et al., *U/Pb zircon geochronology and tempo of the end-Permian mass extinction*, «Science», 1998, 280, pp. 1039-45.

[10] Charles Darwin, *L'origine delle specie*, trad. it. di L. Fratini, Torino, Bollati Boringhieri, 1990, p. 405. Non s'intende naturalmente svilire Darwin: mentre noi oggi ci permettiamo il lusso di discutere delle sottili sfumature concernenti il ritmo dell'evoluzione, alla sua epoca il grande naturalista dovette lottare anche solo per convincere i suoi contemporanei della realtà dell'evoluzione. Come osserva Steven Stanley, Darwin fu costretto a rassicurare i suoi lettori affermando che l'evoluzione era estremamente lenta; solo così, infatti, poteva placare i bollenti spiriti di chi «avrebbe criticato la sua teoria perché, mentre assisteva alla selezione artificiale nell'aia, non accettava di vedere con i propri occhi la selezione in natura». Si veda Steven Stanley, *Macro-evolution*, Johns Hopkins University Press, 1998.

[11] L.W. Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro e H.V. Michel, *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction*, «Science», 1980, 208, pp. 1095-108.

[12] Walter Alvarez, *T.rex e il cratere dell'apocalisse*, trad. it. di B. Osimo, Milano, Mondadori, 1999, p. 10.

[13] *Ibid.* p. 17.

[14] Il cratere fu scoperto, in realtà, appena un anno dopo che Alvarez e i suoi colleghi avevano pubblicato il loro primo articolo sull'estinzione di massa provocata dalla catastrofica collisione. Nel 1981 i geologi impegnati nella ricerca del petrolio avevano mappato il sito, reputando il cratere il più grande mai causato da una collisione, ma non sapevano della teoria di Luis Alvarez. Occorsero altri dieci anni perché gli scienziati collegassero le due cose.

[15] M. Benton, *Scientific methodologies in collision. A history of the study of the extinctions of the dinosaurs*, «Evolutionary Biology», 1990, 24, pp. 371-400.

[16] Walter Alvarez, *T.rex e il cratere dell'apocalisse*, cit., p. 21.

[17] K.A. Farley, A. Montanari, E.M. Shoemaker e C.S. Shoemaker, *Geochemical evidence for a comet shower in the late Eocene*, «Science», 1999, 280, pp. 1250-53.

[18] Steven M. Stanley, *Extinction*, W.H. Freeman, Scientific American Library, 1987, p. 40.

[19] Paul Wignall, «New Scientist», 25 gennaio 1992, p. 55.

[20] David Raup, *L'estinzione. Cattivi geni o cattiva sorte?*, trad. it. di L. Montixi Comoglio, Torino, Einaudi, 1994, p. 94.

[21] David Jablonski, *Background and mass extinctions. The alternation of macroevolutionary regimes*, «Science», 1986, 231, p. 131.

[22] Richard Leakey e Roger Lewin, *La sesta estinzione*, trad. it. di I. Blum, Torino, Bollati Boringhieri, 1998, p. 80.

[23] J.J. Sepkoski, *Ten years in the library. New data confirm paleontological patterns*, «Palaeobiology», 1993, 19, p. 43.

[24] M.J. Benton, *Diversification and extinction in the history of life*, «Science», 1995, 268, pp. 52-58.

[25] Per le mie considerazioni sull'argomento mi sono ispirato al riepilogo critico che hanno fatto M.E.J. Newman e R.G. Palmer in *Theoretical models of extinction. A review, Santa Fe Institute Working Paper 99-08-061*, 1999.

IX. *La rete della vita*

[1] Umberto Eco, *Serendipities*, Weidenfeld & Nicolson, 1999, p. 21.

[2] P. Yodzis, *The indeterminacy of ecological interactions, as perceived through perturbation experiments*, «Ecology», 1988, 69, pp. 508-15.

[3] Charles Darwin rifletté che «la presenza di un gran numero di felini in un distretto poteva determinare ... la frequenza di determinati fiori in quel distretto». Dopotutto, i topi amano fare incursioni nei nidi dei bombi per cercare cibo, sicché più topi significa meno bombi. I gatti mangiano i topi, sicché più gatti significa meno topi e più bombi. Poiché i bombi impollinano il trifoglio rosso e le viole del pensiero, più bombi significa più fiori. L'amore degli inglesi per il gatto domestico dovrebbe, per questa via imprevista ma abbastanza diretta, condurre a giardini più belli. Si veda Jocelyn Kaiser, *Of mice and moths - and Lyme disease?*, «Science», 1998, 279, p. 984.

[4] T. Keitt e H.E. Stanley, *Dynamics of North American breeding bird populations*, «Nature», 1998, 393, pp. 257-60.

[5] S. Kauffman e S. Johnsen, *Coevolution to the edge of chaos. Coupled fitness landscapes, poised states, and coevolutionary avalanches*, «Journal of Theoretical Biology», 1991, 149, p. 467. Si veda anche, S. Kauffman, *Origins of Order*, Oxford University Press, 1993.

[6] Per esempio, supponiamo che ciascun evento genetico raro abbia una probabilità su cento di accadere nel corso di un anno. Le probabilità che se ne verifichino tre in rapida successione sono una su un milione e le probabilità che se ne verifichino dieci di fila sono una su 10^{20}. La probabilità di fare un lungo balzo diminuisce molto rapidamente con l'aumentare della distanza del picco successivo.

[7] Nei suoi scritti, riferendosi al modello, Bak parlò spesso di «fitness di una specie». Per semplificare l'analisi, disse che le lunghezze delle aste rappresentavano la «fitness di una specie» anziché la lunghezza del salto che quella specie doveva compiere per evolvere ancora. I biologi accolsero quell'espressione come un toro accoglierebbe un panno rosso; per la maggior parte di loro, infatti, la fitness non è una proprietà che si possa propriamente assegnare alle specie: secondo la visione ortodossa (per quanto controversa), è corretto attribuirla solo agli individui, perché l'evoluzione opera a livello di individuo. Non ha però senso criticare il modello Bak-Sneppen su tale base, visto che, nella sua legittima forma matematica, non fa alcun riferimento alla fitness delle specie.

[8] È davvero paradossale che i biologi abbiano reagito con tanta ostilità al modello Bak-Sneppen, che è in fondo una versione matematicamente plausibile di una similitudine formulata a suo tempo dallo stesso Charles Darwin. «Il volto della natura» scrisse Darwin nell'*Origine delle specie* «può essere paragonato a

una superficie cedevole, con diecimila cunei sistemati l'uno vicino all'altro e spinti verso l'interno da colpi incessanti – a volte ne viene conficcato uno, e poi un altro con forza maggiore.» Immaginiamo, con Darwin, che numerosi cunei vengano sollevati verso un soffitto di legno; ciascun cuneo rappresenta una specie e la profondità del suo grado di adattamento. Il legno non è un materiale dalla struttura omogenea, per cui ogni cuneo penetrerà con una diversa «forza d'incastro». Per alcuni occorrerà martellare con più forza e insistenza, per altri con meno. Ora, supponiamo che chiunque martelli si muova a caso, battendo sui cunei prima debolmente, poi più forte, finché il cuneo non penetri. Molto probabilmente a spostarsi in avanti sarà il cuneo con la forza d'incastro più debole. Dopo il colpo, penetrerà più a fondo nel soffitto e avrà una nuova forza d'incastro, che potrebbe essere superiore o inferiore a prima. Il martellatore ricomincerà poi a martellare. È, questo, lo stesso esatto quadro del modello di Bak e Sneppen: basta aggiungere la regola che, quando un cuneo penetra più a fondo in seguito a una martellata, con il suo movimento modifica anche la forza d'incastro dei cunei vicini, il che da un lato corrisponde senza dubbio al pensiero di Darwin, dall'altro è perfettamente realistico, in quanto la presenza di un cuneo altera la tensione esercitata sul legno circostante.

[9] Francis Crick, *La folle caccia*, cit., p. 177.

[10] Daniel Dennett, *L'idea pericolosa di Darwin*, cit., p. 127.

[11] Naturalmente Newton si proponeva solo di elaborare le leggi fondamentali del moto. Se avesse progettato di spedire un razzo sulla luna, avrebbe dovuto prendere in considerazione un maggior numero di elementi.

[12] Paul Anderson, «New Scientist», 25 settembre 1969, p. 638.

[13] M.E.J. Newman, *Self-organized criticality, evolution, and the fossil extinction record*, «Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences», 1996, 263, pp. 1605-10.

X. *Montagne russe*

[1] Wassily Leontief, Lettera al direttore, «Science», 9 luglio 1982.

[2] Alfred Zauberman, «The Guardian», 5 ottobre 1983.

[3] John Kay, *Crack in the crystal ball*, «Financial Times», 29 settembre 1995.

[4] «OECD Economic Outlook», giugno 1993.

[5] J. Rothchild, *The Bear Book*, John Wiley, 1998.

[6] Per la verità, nemmeno queste previsioni apparentemente semplici e ovvie sono così scontate. In un'indagine condotta nel 1997, fu chiesto a cinque dei maggiori gruppi britannici esperti in modelli economici classici di dire in che modo avrebbe reagito l'economia a un aumento incrementale della spesa pubblica. Dai risultati emerse che nemmeno nel caso di problemi così elementari vi è accordo a livello teorico. Non solo i diversi gruppi fornirono cifre diverse, ma non furono concordi neppure nello specificare se la produzione economica sarebbe aumentata o diminuita. Si veda Paul Ormerod, *Butterfly Economics*, Faber, 1998.

[7] Rudiger Dornbush, *Growth forever*, «Wall Street Journal», 30 luglio 1998.

[8] Robert Schiller, citato in Robert Prechter jr, *The Wave Principle of Human Social Behaviour*, cit.

[9] Se la teoria economica classica dichiara possibile la previsione, ma porta regolarmente al misero fallimento dei pronostici, perché non viene scartata una volta per tutte? Secondo la plausibile analisi di Robert Prechter, gli economisti non rinunciano alle loro teorie favorite nemmeno quando queste si mostrano inadeguate, perché così facendo sentirebbero di «distruggere l'utilità dello strumento teorico. Al neopallio riesce più facile razionalizzare quando non sa o non pensa molto. Così un giorno di mercato al rialzo il neopallio si troverà impegna-

to a spiegare perché un aumento del Nikkei produrrà un aumento anche a Wall Street ("Indica che la recessione giapponese non peggiorerà e quindi non contagerà gli Stati Uniti"), e il giorno dopo si affretterà a chiarire perché un calo del Nikkei produrrà un aumento a Wall Street ("Quel denaro dovrà confluire in un mercato più forte")». Robert Prechter jr., *The Wave Principle of Human Social Behaviour*, cit. In questo X capitolo attingo parecchio alla spietata critica che Prechter rivolge al pensiero economico contemporaneo.

[10] J.D. Farmer e A. Lo, *Frontiers of finance. Evolution and efficient markets. Santa Fe Institute Working Paper 99-06-039*, 1999.

[11] Alan Kirman, citato in Paul Ormerod, *Butterfly Economics*, cit.

[12] R.E. Litton e A.M. Santomero, «Wall Street Journal», 28 luglio 1998.

[13] John Casti, *Flight over Wall Street*, «New Scientist», 19 aprile 1997.

[14] Benoît Mandelbrot, «Journal of Business», 1963, 36, p. 294.

[15] P. Gopikrishnan, M. Meyer, L.A.N. Amaral e H.E. Stanley, «European Physics J.B.», 1998, 3, p. 139.

[16] Vasiliki Plerou et al., *Scaling of the distribution of price fluctuations of individual companies*, Los Alamos e-print (*con-mat/9907161*), 11 luglio 1999. Per usare un linguaggio rigorosamente tecnico, anziché di fluttuazioni dei prezzi dovrei parlare di «capitalizzazione di Borsa». L'indice Standard & Poor's 500 non è una semplice media dei prezzi delle azioni di 500 società quotate, ma una media ponderata, nella quale le società con più azioni in circolazione hanno maggior peso statistico. Analogamente, nell'indagine sulle singole società si usa come parametro per le fluttuazioni il corso azionario moltiplicato per il numero di azioni in circolazione. Niente di tutto ciò, ovviamente, modifica la conclusione che il mercato ha ampie fluttuazioni.

[17] R.N. Mantegna, *Levy walks and enhanced diffusion in the Milan stock exchange*, «Physica A.», 1991, 179. p. 232.

[18] O.V. Pictet et al., *Statistical study of foreign exchange rates, empirical evidence of a price change scaling law and intraday analysis*, «Journal of Bank and Finance», 1995, 14, pp. 1189-208.

[19] Y. Liu et al., *Statistical properties of the volatility of price fluctuations*, «Physical Review E», 1999, 60, pp. 1-11.

[20] Paul Ormerod, *Butterfly Economics*, cit., p. 36.

[21] D. Sornette e D. Zejdenweber, *Economic returns of research. The Pareto law and its implications*, Los Alamos e-print (*cond-mat/9809366*), 27 settembre 1998.

[22] T. Lux e M. Marchesi, *Scaling and criticality is a stochastic multi-agent model of a financial market*, «Nature», 1999, 397, pp. 498-500.

[23] Bernard Baruch, citato in Robert Prechter jr., *The Wave Principle of Human Social Behaviour*, cit.

[24] D. Watts e S. Strogatz, *Collective dynamics of «small world» networks*, «Nature», 1998, 393, pp. 440-42.

XI. *Volenti o nolenti*

[1] André Gide, *L'immoralista*, trad. it. di S. Carcano, Milano, Mursia, 1966-1988, p. 25.

[2] Fëdor Dostoevskij, *Memorie dal sottosuolo*, trad. it. di E. Guercetti, Milano, Garzanti, 1998, p. 34.

[3] D. Helbing, J. Keltsch e P. Molnar, *Modelling the evolution of human trail systems*, «Nature», 1997, 388, pp. 47-50.

[4] D. Zanette e S. Manrubia, *Role of intermittency in urban development. A model of large-scale city formation*, «Physical Review Letters», 1997, 79, pp. 523-26.

[5] Per essere più precisi, il modello di Damian Zanette e Susanna Manrubia parte dal presupposto che in un dato anno la popolazione in una data area circo-

scritta del mondo aumenti o diminuisca di una frazione casuale. O meglio, la popolazione varia a caso, ma le percentuali di crescita o diminuzione sono ogni anno proporzionali alla popolazione già esistente. È una logica sensata: la variazione approssimativa della popolazione di New York sarà ovviamente più alta di quella di Lubbock, Texas.

[6] Si veda H.A. Makse, S. Havlin e H.E. Stanley, *Modelling urban growth patterns*, «Nature», 1995, 377, pp. 608-12. Si veda anche, Michael Batty e Paul Longley, *Fractal Cities*, Academic Press, 1994.

[7] J.-P. Bouchard e M. Mézard, *Wealth condensation in a simple model of the economy*, Los Alamos e-print (*cond-mat/0002374*), 24 febbraio 2000.

XII. *Terremoti culturali*

[1] Richard Evans, *In Defence of History*, cit., p. 61.

[2] J.F. Jameson, citato in Peter Novick, *That Noble Dream*, cit.

[3] Sidney Fay, *The Origins of the World War*, Macmillan, 1949.

[4] Charles Beard, *Heroes and villains of the World War*, «Current History», 1926, 24, p. 733.

[5] Harry Elmer Barnes, *The Genesis of the World War. An Introduction to the Problem of War Guilt*, Scholarly Press, 1968, pp. 658-59.

[6] Richard Evans, *In Defence of History*, cit. Citato anche in Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, trad. it. di C. Ginzburg, a cura di R.W. Davies, Torino, Einaudi, 1966, p. 13. [*NdT*]

[7] Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., p. 13.

[8] *Ibid.*, p. 69.

[9] Conyers Read, citato in Peter Novick, *That Noble Dream*, cit., p. 192.

[10] Thomas Carlyle, citato in Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., p. 55.

[11] In realtà, quando Conyers Read fece le considerazioni da me citate, si riferiva solo indirettamente alle crisi politiche nazionali o internazionali. Scrisse quel commento nel 1937, quando era preoccupato per la crisi della storiografia americana, che stava allora subendo le forti pressioni dei pedagogisti, decisi a includere nei programmi scolastici gli studi sociali. Gli storici più conservatori erano indignati, ma Read fece loro osservare che se avessero puntato i piedi, avrebbero solo creato le condizioni per un cambiamento rivoluzionario di portata ancor maggiore.

[12] Peter Novick, *That Noble Dream*, cit., p. 192.

[13] Michael Polanyi, *The potential theory of adsorption. Authority in science has its uses and its dangers*, «Science», 1963, 141, p. 1012. Ho leggermente cambiato l'ordine dei termini nella frase centrale perché il senso fosse più chiaro.

[14] Thomas Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, trad. it. di A. Carugo, Torino, Einaudi, 1999, p. 30.

[15] Kuhn tiene sovente a precisare che il paradigma consiste non solo in teorie, ma anche in molte nozioni e procedure implicite ed esplicite che contribuiscono all'applicazione pratica delle teorie. Perciò non è strettamente corretto dire che un paradigma è «un insieme di buone idee». La semplificazione, però, rende l'analisi assai più chiara e non pregiudica in alcun modo le argomentazioni successive.

[16] Thomas Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., p. 44.

[17] Ralph Kronig, «The turning point», in *Theoretical Physics in the Twentieth Century. A Memorial Volume to Wolfgang Pauli*, a cura di M. Fierz e V.F. Weisskopf, Interscience, 1960, p. 22.

[18] Thomas Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., p. 24.

[19] Ralph Kronig, «The turning point», cit., pp. 25-26.

[20] Peter Novick, *That Noble Dream*, cit., p. 526.
[21] Thomas Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., Poscritto 1969, pp. 218-19.

XIII. *Tradizione e rivoluzione*

[1] John Krasher Price, *Government and Society*, New York University Press, 1954.
[2] Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., Note alla seconda edizione, p. XI.
[3] Thomas Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., p. 12.
[4] Sidney Redner, «European Physics J.B.», 1998, 4, pp. 131-34.
[5] Citato in Cyril Domb, *The Critical Point*, Taylor & Francis, 1998, p. 130.
[6] Citato in Alan Mackay, *A Dictionary of Scientific Quotations*, cit.
[7] Paul Kennedy, *Ascesa e declino delle grandi potenze*, cit., p. 20.
[8] Thomas Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, cit., pp. 119-20
[9] Fëdor Dostoevskij, *Memorie dal sottosuolo*, cit., p. 29.
[10] J.S. Levy, *War in the Modern Great Power System 1495-1975*, University of Kentucky Press, 1983, p. 215. Ringrazio Bruce Malamud per avermi segnalato il saggio di Levy.
[11] D.L. Turcotte, *Self-organized criticality*, «Reports on Progress in Physics», 1999, 62, pp. 1377-429.
[12] Norman Davies, *Europe*, Pimlico, 1997, p. 900.
[13] Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., p. 57.
[14] Citato in Peter Novick, *That Noble Dream*, cit., p. 139.

XIV. *L'importanza della storia*

[1] Richard Evans, *In Defence of History*, cit., p. 62.
[2] In Alan J. Mackay, *A Dictionary of Scientific Quotations*, cit.
[3] Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., pp. 59-60.
[4] Citato in Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., p. 53.
[5] Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., p. 52.
[6] *Ibid.*, p. 55.
[7] Alexis de Tocqueville, *La democrazia in America*, a cura di G. Candeloro, Milano, Rizzoli, 1982.
[8] Richard Evans, *In Defence of History*, cit., p. 133.
[9] Georg Wilhelm Friedrich Hegel, *Lineamenti di filosofia del diritto*, trad. it. di F. Messineo, Bari, Laterza, 1913, p. 399.
[10] Citato in R. Evans, *In Defence of History*, cit., p. 62.
[11] Edward Hallett Carr, *Sei lezioni sulla storia*, cit., pp. 28-29.
[12] Citato in Niall Ferguson, «Virtual history. Towards a "chaotic" theory of the past», in *Virtual History*, a cura di Niall Ferguson, Picador, 1997, p. 50.

XV. *Poscritto metascientifico*

[1] Discorso per la cerimonia del conferimento delle lauree alla Penn State University, citato in Duncan Watts, *Small Worlds*, Princeton University Press, 1999.
[2] Stephen Jay Gould, *La vita meravigliosa*, trad. it. di L. Sosio, Milano, Feltrinelli, 1995, p. 292.
[3] Niall Ferguson, «Virtual history», cit., p. 72.
[4] Herbert Butterfield, *The Origins of History*, Eyre Methuen, 1981, p. 200 e seguenti. Si veda anche Niall Ferguson, «Virtual history», cit., p. 20.

[5] J.S. Langer, «Nonequilibrium physics, in *Critical Problems in Physics*, Princeton University Press, 1997.
[6] Lev Tolstoj, *Guerra e pace*, trad. it. di E. Cadei, Milano, Mondadori, 1965, vol. IV, p. 362.
[7] *Ibid.*, pp. 364-65.

Ringraziamenti

Ringrazio sia i molti scienziati che si sono presi la briga di leggere e commentare parti del manoscritto, sia quelli che mi hanno generosamente fornito cifre, dati o utili informazioni. Un grazie speciale a Robert Geller, Christopher Scholtz, Lena Oddershede, Tom Witten, Paul Meakin, Jim Meiss, Kim Christensen, Stefano Zapperi, Leo Kadanoff, Dietrich Stauffer, James Binney, Mark Newman, Bruce Malamud, Jeffrey Lockwood, Roy Anderson, Michael Benton, William Clemens, Peter Yodzis, Gene Stanley, Thomas Lux, Parameswaran Gopikrishnan, Dirk Helbing, Sidney Redner, Gottfried Mayer-Kress e Lewis Miller. Non si deve naturalmente pensare che gli scienziati menzionati condividano tutto o anche solo una parte di quanto ho scritto; e di ogni eventuale errore che comparisse nel testo mi assumo l'esclusiva responsabilità.

Per finire, ringrazio Peter Tallack della Weidenfeld & Nicolson, che ha avuto fiducia nel progetto, e ringrazio soprattutto mia moglie Kate, che mi ha dato sostegno e incoraggiamento costanti nei lunghi mesi della stesura.

Mark Buchanan

Notre Dame de Courson, luglio 2000

Indice dei nomi

Acton, John Emerich, 217
Adkins, Homer, 79
Alessandro I, re di Grecia, 222
Alvarez, Luis, 116-17
Alvarez, Walter, 116, 118
Alvord, Clarence, 4-5
Amaral, Luis, 142
Anderson, Paul, 144
Anderson, Roy, 103-04
Antonio, Marco, 222
Augusto, Caio Giulio Cesare Ottaviano, imperatore, 222

Bachelier, Louis, 154-55, 158
Bak, Per, 14-17, 65-66, 68-72, 74, 76-77, 94-95, 105-07, 109, 134-37, 140
Bakun, William, 30-31
Barnes, Harry Elmer, 181
Baruch, Bernard, 162
Beard, Charles, 180-81
Bell, Eric Temple, 37
Bénard, Henri, 106
Benton, Michael, 121-23
Berlin, Isaiah, 48
Bohr, Niels, 48, 192, 215
Bouchaud, Jean-Philippe, 177-78
Bowring, Samuel, 114
Brady, Brian, 26
Broglie, Louis-Victor de, 192
Browning, Iben, 25, 27
Burridge, R., 66, 68, 72
Butterfield, Herbert, 228, 232

Camus, Albert, 14, 23, 64
Carlo VIII, re di Francia, 211
Carlyle, Thomas, 185, 216, 218
Carr, Edward Hallett, 185, 196, 214, 217, 221-23
Ceausescu, Nicolae, 213
Chen, Kan, 71-72
Christensen, Kim, 72, 74, 107
Churchill, Winston, 204, 222
Čirikov, Boris, 55
Cleopatra, regina d'Egitto, 222
Colombo, Cristoforo, 219
Copernico, Niccolò, 188, 194
Crick, Francis, 21, 61, 76, 140-41

Darwin, Charles, 115, 194
Davies, Norman, 212
Dennett, Daniel, 112, 140-41
Dirac, Paul, 48, 192
Dostoevskij, Fëdor, 169, 209

Eco, Umberto, 126
Einstein, Albert, 64, 102, 126, 192, 194, 200-02, 215, 221
Eisenhower, Dwight, 181-82
Evans, Richard, 32, 180, 216, 218

Farley, Ken, 118
Farmer, J.D., 151
Fay, Sidney, 180
Feder, Hans Jacob, 71-72, 74
Feder, Jens, 71-72
Ferguson, Niall, 231
Fermi, Enrico, 93-95, 99
Feynman, Richard, 48, 74, 187
Fisher, Herbert Albert Laurens, 6, 8
Flaubert, Gustave, 221

Francesco Ferdinando, arciduca d'Austria, 3-4
Fukuyama, Francis, 38

Galbraith, John Kennet, 3, 22
Gandhi, Mohandas Karamchand «Mahatma», 216
Geller, Robert, 28-29
Gibbon, Edward, 185
Gibbs, Josiah Willard, 83
Gide, André, 169
Gilbert, William, 80
Glickman, Max, 48
Goldberger, Ary, 52
Gorbaciov, Michail, 216
Gould, Stephen Jay, 230
Grey, Edward, 181
Grinstein, Geoff, 108
Guderian, Heinz, 182
Guglielmo II, imperatore di Germania, 181, 217
Gutenberg, Beno, 40, 42-44, 46, 197-98
Guyll, Max, 180

Hegel, Georg Wilhelm Friedrich, 220, 225
Heisenberg, Werner, 48, 192, 194
Helbing, Dirk, 171-73
Hitler, Adolf, 181-82, 216-18

Ito, Keisuke, 73

Jablonski, David, 120
James, William, 14
Johnsen, Sonke, 133-34

Kadanoff, Leo, 89-90
Kagan, Yakov, 32, 64-65
Kapitza, Pëtr, 79-81, 88
Karlin, Samuel, 93
Kauffman, Stuart, 129-31, 133-34
Kaufman, Bruria, 85
Kay, John, 148
Keitt, Timothy, 128-29
Kelvin, Lord, *v.* Thomson, William
Kennedy, Paul, 21-22, 207
Keplero, Johannes, 54
Kierkegaard, Søren, 6
Knopoff, Leon, 66, 68, 72
Koch, Helge von, 53
Kuhn, Thomas, 186, 188-93, 195, 196, 200, 202, 205-08

Langer, James, 233
Leakey, Richard, 120
Leontief, Wassily, 148
Levy, Jack, 211-12, 224
Lewin, Roger, 120
Lipps, Jere, 122
Lo, A., 151
Lockwood, Dale, 102
Lockwood, Jeffrey, 102
Lux, Thomas, 159-61, 164

Malamud, Bruce, 96-101
Mandelbrot, Benoît, 49, 51-54, 154-55
Manrubia, Susanna, 123, 174-76
Marchesi, Michele, 159-61
Marco Antonio, *v.* Antonio, Marco
Marx, Karl, 217, 225
Medawar, Peter, 28
Meyer, Martin, 142
Mézard, Marc, 177-78
Milgram, Stanley, 164-67
Morein, Gleb, 96, 99-100

Neumann, John von, 63
Newman, Mark, 144-45
Newton, Isaac, 7, 13, 48, 54, 95, 141, 194
Nicola II, zar di Russia, 217
Nietzsche, Friedrich, 37, 63
Novick, Peter, 193

Oakeshott, Michael, 224
Olami, Zeev, 72, 74
Omori, Fusakichi, 74
Onsager, Lars, 83-85, 88-89, 91, 201
Oppenheimer, Robert Julius, 79
Ormerod, Paul, 158
Ottaviano, *v.* Augusto, Caio Giulio Cesare Ottaviano

Papen, Franz von, 218
Pauli, Wolfgang, 191-92
Planck, Max, 95, 191-92, 201
Poincaré, Jules-Henri, 18, 221
Polanyi, Michael, 187-89, 194
Price, John Krasher, 196

Princip, Gavrilo, 3
Ranke, Leopold von, 184, 218
Raup, David, 120
Read, Conyers, 185-86, 208, 224
Redner, Sidney, 198-200, 202, 206
Rhodes, Chris, 103-04
Richardson, Lewis, 209, 211, 224
Richter, Charles, 24, 40, 42-44, 46, 197-98

Saunders, Leonard, 59
Scholz, Christopher, 75, 97, 211
Schrödinger, Erwin, 48-49, 192
Sepkoski, Jack, 121-23
Signor, Phil, 122
Sneppen, Kim, 134-37, 140
Socrate, 62
Sofia Chotek, arciduchessa d'Austria, 3
Sole, Ricard, 123
Stanley, Gene, 128-29, 155, 157
Stanley, Steven, 119
Steinmetz, Charles Proteus, 216
Sterne, Laurence, 112
Strogatz, Steve, 165-67, 197-98

Tang, Chao, 14-17, 65-66, 68-72, 74, 76-77, 94-95, 105-07, 109
Taylor, A.J.P., 4
Taylor, Brian, 55
Thom, René, 18
Thomson, William (Lord Kelvin), 191
Tobin, James, 163-64
Tocqueville, Charles-Alexis Clérel de, 217
Tolstoj, Lev Nikolaevič, 234
Toynbee, Arnold, 225
Turcotte, Donald, 96, 99-100, 212
Twain, Mark, 27

Valéry, Paul, 3, 24
Van Valen, Leigh, 118
Vespignani, Alessandro, 110

Watson, James, 61
Watts, Duncan, 165-67, 197-98
Weisenfeld, Kurt, 14-17, 65, 77, 94-95, 105-07, 109
Wheeler, John Archibald, 58
Whitehead, Alfred North, 93
Wignall, Paul, 119
Wigner, Eugene, 94
Wilson, Edward O., 221, 228
Witten, Tom, 59

Yodzis, Peter, 127

Zanette, Damian, 174-76
Zapperi, Stefano, 110
Zauberman, Alfred

84954

Volumi pubblicati nella collezione «Saggi»

A. Torno, *Piccola storia dell'amore*
Poeti, filosofi, avventurieri, innamorati alle prese con la più dolce delle passioni

F. e L. Cavalli-Sforza, *La scienza della felicità*
Ragioni e valori della nostra vita

W. Pasini, *Desiderare il desiderio*
Come accenderlo, come ritrovarlo

S.B. Nuland, *La saggezza del corpo*
Il miracoloso e sorprendente universo che è dentro di noi

E. Dyson, *Release 2.0*
Come vivere nell'era digitale

G. Ravasi, *Il Dio vicino*
Storia e fede nella preghiera biblica

S. Vegetti Finzi, *Volere un figlio*
La nuova maternità fra natura e tecnica

D. Francescato, *Amore e potere*
La rivoluzione dei sessi nella coppia e nella società

G. Abraham, *I segreti del nostro corpo*
Conquistare la salute ascoltando se stessi

F.J. Sulloway, *Figli maggiori, figli minori*
Come la competizione tra fratelli determina la personalità

R.H. Hopke, *Nulla succede per caso*
Le coincidenze che cambiano la nostra vita

G. Burbatti, I. Castoldi, *Il pianeta degli adolescenti*
I giovani d'oggi spiegati agli adulti

Lama Surya Das, *Gli otto gradini*
La saggezza tibetana per il mondo occidentale

J. Bottéro, M.-A. Ouaknin, J. Moingt, *La più bella storia di Dio*
Chi è il Dio della Bibbia?

S. Kitzinger, *Diventare nonna*
Come affrontare un'esperienza travolgente senza esserne travolta

G. Pettinato, *La scrittura celeste*
La nascita dell'astrologia in Mesopotamia

B. Magee, *L'arte di stupirsi*
Da Platone a Popper: le risposte dei filosofi ai paradossi della vita

G. Claxton, *Il cervello lepre e la mente tartaruga*
Pensare di meno per capire di più

W. Alvarez, *T.Rex e il cratere dell'Apocalisse*
La più recente e straordinaria ipotesi sulla scomparsa dei dinosauri
nel racconto di un grande scienziato

S. Zecchi, L'artista armato
Contro i crimini della modernità

R. Thurman, *La rivoluzione interiore*
La vita, la libertà e la ricerca della vera felicità

W. Pasini, *La vita è semplice*
Come riconoscere le personalità difficili e vivere meglio

G. García Márquez, *Gente di Bogotá*

M. Baldacci, *Il Diluvio*
Mito e realtà del più grande cataclisma di tutti i tempi

E. Boncinelli, *Il cervello, la mente e l'anima*
Le straordinarie scoperte sull'intelligenza umana

D.N. Stern, N. Bruschweiler Stern, *Nascita di una madre*
Come l'esperienza della maternità cambia una donna

G. Dacquino, *Se questo è amore*
Conoscersi meglio per imparare a farsi amare

S. Coren, *Cani e padroni*
Come trovare il cane ideale per la propria personalità

D. McNeill, *La faccia*
Storie e segreti del volto umano

E.O. Wilson, *L'armonia meravigliosa*
Dalla biologia alla religione, la nuova unità della conoscenza

E. Zolla, *La filosofia perenne*
L'incontro fra le tradizioni d'Oriente e d'Occidente

J.R. Harris, *Non è colpa dei genitori*
La nuova teoria dell'educazione: perché i figli imparano più dai coetanei che dalla famiglia

M. Piazza, *Le ragazze di cinquant'anni*
Amori, lavori, famiglie e nuove libertà

V.S. Ramachandran, S. Blakeslee, *La donna che morì dal ridere*
e altre storie incredibili sui misteri della mente umana

R. Noll, *Jung, il profeta ariano*

A. Torno, *La truffa del tempo*
Scienziati, santi e filosofi all'eterna ricerca di un orologio universale

W. Pasini, D. Francescato, *Il coraggio di cambiare*

S. Zecchi, *Capire l'arte*
Come riconoscerla, perché amarla

T. Regge, *L'universo senza fine*
Breve storia del Tutto: passato e futuro del cosmo

G. Abraham, *Il sogno del secolo*
La psicoanalisi cent'anni dopo

S. Dehaene, *Il pallino della matematica*
Scoprire il genio dei numeri che è in noi

Dalai Lama, *L'arte della felicità*

P. Davies, *Da dove viene la vita*
Il mistero dell'origine sulla Terra e in altri mondi

J.-C. Kaufmann, *C'era una volta il principe azzurro*
Donne che vivono da sole, ma non smettono di sognare

J. Rifkin, *L'era dell'accesso*
La rivoluzione della new economy

D. Mainardi, *La strategia dell'aquila*
Gli uccelli ci raccontano come eravamo, come siamo, come dovremmo essere

R. Sheldrake, *I poteri straordinari degli animali*
Cani telepatici, gatti che prevedono i terremoti, tartarughe che ritrovano la strada di casa

S. Natoli, *La felicità di questa vita*
Esperienza del mondo e stagioni dell'esistenza

A. Sen, *Lo sviluppo è libertà*
Perché non c'è crescita senza libertà

D. Parisi, *Scuol@.it*
Come il computer cambierà il modo di studiare dei nostri figli

G. Dacquino, *Credere e amare*

T.L. Friedman, *Le radici del futuro*
La sfida tra la Lexus e l'ulivo: che cos'è la globalizzazione e quanto conta la tradizione

S. Pinker, *Come funziona la mente*

S. Vegetti Finzi, A.M. Battistin, *L'età incerta*
I nuovi adolescenti

G. Ravasi, *Preghiere*
L'ateo e il credente davanti a Dio

S. Zavoli, P. Coda, *Se Dio c'è*
Le grandi domande

A. Chouraqui, *I dieci Comandamenti*
I doveri dell'uomo nelle tre religioni di Abramo

G. García Márquez, *Dall'Europa e dall'America*
1955-1960

W. Pasini, *L'autostima*
Volersi bene per voler bene agli altri

S.B. Nuland, *I misteri del corpo*

P.C. Thiede, M. D'Ancona, *La vera Croce*
Da Gerusalemme a Roma alla ricerca del simbolo del cristianesimo

J. Rifkin, *Ecocidio*
Ascesa e caduta della cultura della carne

C. Flamigni, *Avere un bambino*
Come inizia una vita: dal concepimento al parto

K. Davies, *Il codice della vita*
Genoma: la storia e il futuro di una grande scoperta

B. Spinelli, *Il sonno della memoria*
L'Europa dei totalitarismi